CALCIO Y MAGNESIO. MANEJO DE FERTILIZACION Y ENMIENDAS

Introducción

El calcio (Ca) y magnesio (Mg) son considerados macronutrientes secundarios debido a que se presentan como deficientes para las plantas en forma menos frecuente que los macronutrientes nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). De todas maneras son requeridos para el crecimiento vegetal en cantidades relativamente grandes. Ambos elementos son de carácter básico desde el punto de vista de su reacción en el suelo. Tanto el Ca como el Mg han sido mayoritariamente utilizados en fertilizaciones y correcciones de suelos ácidos en regiones tropicales y subtropicales, donde la problemática se origina a partir de procesos genéticos naturales que provocan la pérdida de estos cationes. Sin embargo, en algunas regiones templadas el proceso de acidificación, disminución o desbalance del contenido de estos nutrientes en el suelo, se ha producido fundamentalmente por razones antrópicas. La causa principal del proceso de su pérdida de los suelos es la exportación de bases a través de la producción agrícola y ganadera. Esto ocurrió durante largos periodos de tiempo en regiones donde no ha existido historia de reposición de estos nutrientes. Otra de las razones de la acidificación en estos suelos ha sido el crecimiento del uso de fertilizantes de alto índice de acidez, fundamentalmente los nitrogenados amoniacales. En estas situaciones se han informado respuestas por parte de numerosos cultivos a la aplicación de fertilizantes cálcicos y magnésicos, así como también a la aplicación de enmiendas básicas tendientes a neutralizar la acidez del suelo. En producciones intensivas, aun existiendo cantidades adecuadas de Ca y Mg en el suelo, puede ocurrir que la elevada demanda por parte de este tipo de cultivos provoque que no se logren reponer estos nutrientes a la solución del suelo a la velocidad con que son absorbidos, por lo que en muchas situaciones es necesaria su aplicación. Por otro lado, también se ha señalado la utilidad del uso de enmiendas cálcicas (específicamente yeso o sulfato de calcio) para recuperar suelos afectados por sodio (Na). En áreas reducidas o producciones intensivas, esta práctica ha demostrado ser muy efectiva para disminuir la toxicidad del Na y mejorar las condiciones físicas. Esto ocurre por que el Na es remplazado por el Ca proveniente del yeso y luego lavado hacia horizontes más profundos fuera del alcance de las raíces de los cultivos.

En este capítulo se señalarán algunos conceptos básicos relacionados con la dinámica en el suelo de Ca y Mg, la nutrición vegetal, el diagnóstico de las situaciones de deficiencia y/o desbalance, así como de la tecnología de fertilización utilizada en la aplicación de estos elementos. Se presentarán conceptos básicos referidos al diagnóstico de la necesidad de encalado, las características técnicas de las diferentes enmiendas básicas y el manejo de las mismas. Por ultimo, se discutirá la importancia del enyesado en suelos afectados por Na, la naturaleza de los productos existentes en el mercado y la determinación de la dosis a emplear.

1. Origen del calcio y magnesio

El contenido medio de Ca presente en la corteza terrestre es de 3,64% y el de Mg de 2,07%, siendo estas cifras superiores a varios de los elementos considerados nutrientes vegetales (Tabla 1). El Ca del suelo proviene de distintos minerales primarios, entre los que se incluyen alúmino-silicatos, tales como feldespatos y anfiboles, y otros como fosfatos y carbonatos. Dentro de los fosfatos predominan las apatitas, entre ellas la hidroxiapatita y la fluorapatita. Dentro de

los carbonatos, típicos de suelos calcáreos, predominan la calcita o caliza ($CaCO_3$) y la dolomita ($CaCO_3.MgCO_3$). En zonas áridas puede presentarse acumulación de yeso ($CaSO_4.2H_2O$). El contenido de Ca total en el suelo puede fluctuar entre 0,1% en zonas tropicales, hasta 25% en suelos de zonas áridas con calcáreo, siendo 0.5 a 1.5% un rango normal para suelos no calcáreos. Valores superiores a 3% indican la presencia de $CaCO_3$ libre, en forma pulverulenta o de concreciones en la masa de suelo (Darwich, 2006).

Entre los minerales primarios que aportan Mg, pueden citarse a la biotita, la serpentina, la hornblenda y el olivino. Simultáneamente, diferentes minerales secundarios contienen este elemento. Entre ellos se encuentran las arcillas como clorita, vermiculita, illita y montmorillonita. Algunos suelos poseen minerales magnésicos equivalentes a los cálcicos, magnesita ($MgCO_3$), dolomita y kierserita ($MgSO_4.H_2O$).

Tabla 1. Composición elemental promedio de la corteza terrestre hasta una profundidad de 16 km (Mengel y Kirkby, 2000).

Elemento	**Concentración**	**Elemento**	**Concentración**
	--- % ---		--- % ---
O	46,46	H	0,14
Si	27,61	P	0,12
Al	8,07	C	0,09
Fe	5,06	Mn	0,09
Ca	3,64	S	0,06
Na	2,75	Cl	0,05
K	2,58	Br	0,04
Mg	2,07	F	0,03
Ti	0,62	Otros	0,52

En consecuencia, el contenido de ambos elementos en los suelos está relacionado con la riqueza del material parental, pero también con el grado de meteorización sufrido por el mismo. El proceso de lixiviación que ocurre en zonas húmedas a partir de los elementos disueltos en la solución del suelo, va disminuyendo progresivamente el contenido de estos cationes. En general, los suelos que se desarrollaron bajo condiciones de aridez y baja meteorización, poseen un alto contenido de Ca y Mg, mientras que los suelos originados en condiciones tropicales o subtropicales, como los Oxisoles y Ultisoles, sujetos a severos procesos de meteorización, presentan bajos contenidos de estos nutrientes. Por otro lado, los suelos del orden Molisol, típicos de ambientes templados, se encuentran generalmente bien provistos. Los suelos de tipo Spodosol, de clima frío y vegetación de coníferas, son otro ejemplo de suelos con bajo contenido de bases, en este caso por procesos de quelación con materia orgánica y migración en el perfil de las mismas.

2. Formas en el suelo, disponibilidad y función fisiológica

2.1. Formas y dinámica de Ca y Mg en el suelo

En regiones húmedas donde predominan suelos ácidos, el Ca^{+2} y el Mg^{+2} ocupan una fracción relativamente menor del complejo de intercambio, con respecto a suelos neutros o calcáreos de regiones templadas, donde los cationes básicos saturan la capacidad de intercambio catiónica (CIC). Al igual que otros cationes, las formas intercambiables y solubles de Ca^{+2} y Mg^{+2} se encuentran en equilibrio dinámico y representan la mayoría del Ca^{+2} y Mg^{+2} disponible para las plantas (Figura 1). Si la concentración de estos elementos en la solución del suelo decrece debido a la absorción por parte de las plantas o el lavado, parte del Ca^{+2} y Mg^{+2} que se encuentra adsorbidos al complejo de intercambio, es liberada (desorción) para restablecer su concentración en la solución del suelo. Así mismo, otros cationes solubles pueden tomar el lugar del Ca^{+2} y Mg^{+2} adsorbidos, liberando estos a la solución del suelo. Las formas solubles actúan como puentes catiónicos entre coloides orgánicos e inorgánicos, incidiendo a través de este mecanismo en su floculación, favoreciendo la estructura y su estabilidad. Típicamente, la concentración de la solución de suelos de regiones templadas varía entre 30 y 300 mg kg^{-1} para Ca^{+2}, y entre 5 y 50 mg kg^{-1} para Mg^{+2}. En regiones más húmedas estos valores son significativamente menores y oscilan entre 5 y 50 mg kg^{-1} para Ca^{+2}, y entre 2 y 15 mg kg^{-1} para Mg^{+2}.

El Ca^{+2} y Mg^{+2} disueltos a partir de minerales cristalizados a través de procesos de meteorización, al igual que las sales del suelo, también pueden aportar estos nutrientes a la solución o al complejo de intercambio. Contrariamente, si la solución del suelo es incrementada con estos cationes, por ejemplo mediante la fertilización, aplicación de enmiendas o el aporte de residuos animales o vegetales, el equilibrio se desplaza en la dirección inversa, incrementando el contenido de Ca^{+2} y Mg^{+2} adsorbidos. Los destinos de estos elementos son de alguna manera más simples que para otros nutrientes: ambos cationes pueden ser absorbidos por los cultivos o microrganismos, lavados con el agua que percola a través del suelo, perdidos por erosión, adsorbidos al complejo de intercambio, o reprecipitados/cristalizados en forma de compuestos secundarios, particularmente en climas áridos. Entre los procesos naturales de ganancia o aporte de estos elementos, se destacan la sedimentación derivada de la erosión, el ascenso de napas salobres y la deposición atmosférica.

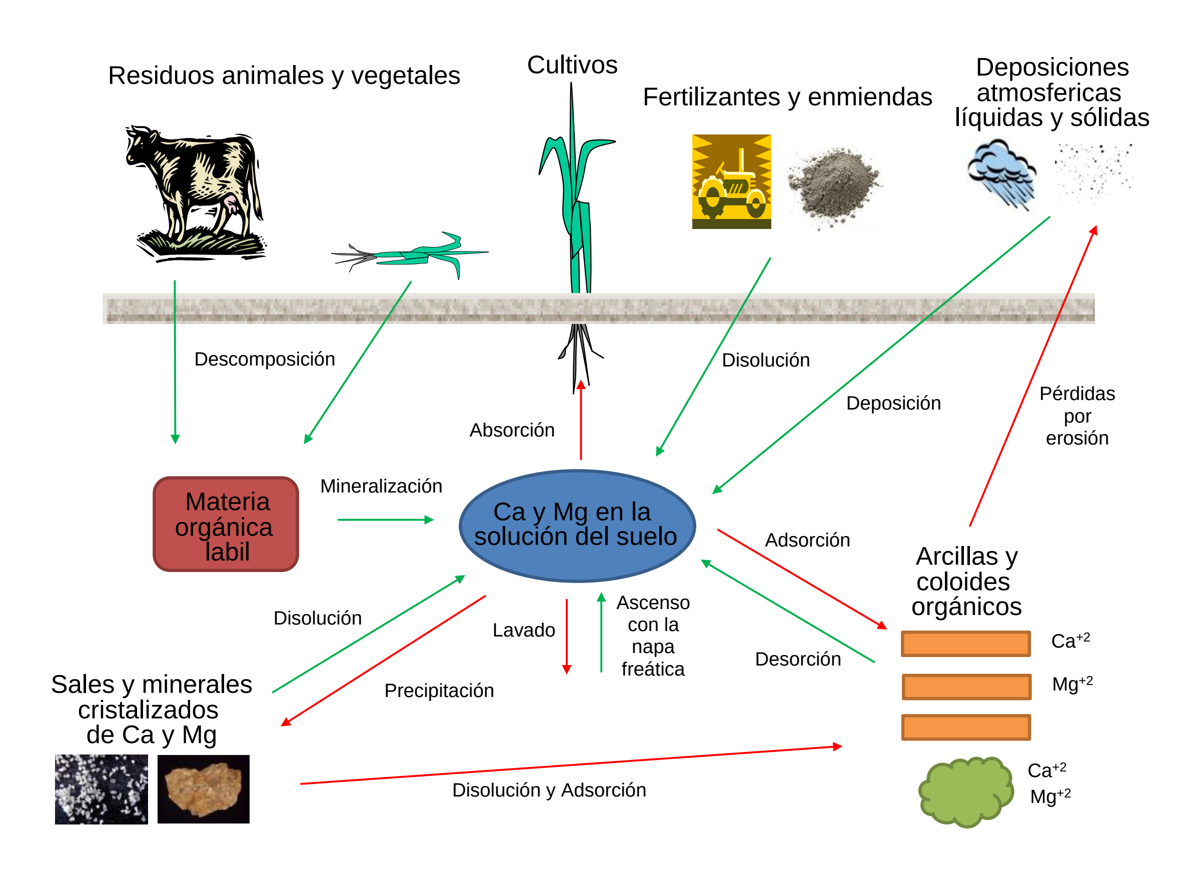


Figura 1. Ciclo del Ca y Mg en el suelo.

La actividad de estos elementos en la solución del suelo es un factor decisivo en la absorción de estos nutrientes por los vegetales y depende, fundamentalmente, del nivel de sus formas intercambiables y del tipo de coloide. En general, suelos con altos contenidos de arcillas y materia orgánica (alta CIC) poseen buena dotación de estos nutrientes para los cultivos. Sin embargo, el porcentaje de saturación de la CIC del suelo con estos cationes es aun más importante que su contenido total en el suelo. Por ejemplo, un suelo de baja CIC con 5 $cmol_c\ kg^{-1}$ de Ca^{+2} intercambiable pero con alto porcentaje de saturación con este catión, puede suplir mejor las necesidades de un cultivo que un suelo con alta CIC y 15 $cmol_c\ kg^{-1}$ de Ca^{+2} pero con bajo porcentaje de saturación. Así mismo, altos porcentajes de saturación con Ca^{+2} están asociados a un pH favorable para el crecimiento de las plantas y microrganismos, y generalmente reflejan bajo contenido de Al^{+3} intercambiable en suelos ácidos y de Na^{+} en suelos sódicos.

El tipo de coloide también influye en la disponibilidad de Ca^{+2} y Mg^{+2} para las plantas. La materia orgánica y las arcillas de tipo 1:1 retienen estos iones en menor medida que las arcillas de tipo 2:1 (Camberato y Pan, 2000). La afinidad del Ca^{+2} y el Mg^{+2} por la montmorillonita es similar, pero la del Mg^{+2} por la vermiculita es mayor que la del Ca^{+2}. Suelos con un complejo de intercambio constituido por materia orgánica, alófanos, caolinita y óxidos de Fe y Al, tienen mayor afinidad por el Ca^{+2} que por el Mg^{+2}. A diferencia de otros nutrientes, el contenido de estos elementos en la materia orgánica, en general es reducido, por lo que la mineralización de Ca y Mg no juega un rol importante en la nutrición de las plantas.

El contenido de Ca y Mg afecta otros procesos pedogenéticos. Por ejemplo, elevados contenidos de Ca favorecen la formación de complejos con fracciones húmicas y estructuras estables, propiciando con ello una adecuada dinámica del aire y el agua edáficos.

La lixiviación de Ca en suelos de regiones templadas es del orden de 200-300 kg ha^{-1} $año^{-1}$, mientras que las de Mg van desde cifras nulas hasta alrededor de 60 kg ha^{-1} $año^{-1}$, dependiendo de las condiciones texturales.

En zonas húmedas, el $CaCO_3$ del material parental se solubiliza en presencia de CO_2 y agua, transformándose en $Ca(HCO_3)_2$. Esta forma química permite la migración en el perfil. Cuando la presión parcial del CO_2 disminuye en profundidad, por menor actividad biótica, y/o el régimen hídrico se hace menos percolante, reprecipitan los carbonatos (Zapata, 2006).

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \longrightarrow Ca^{2+} + 2(HCO_3)^-$$

Además del CO_2, el pH juega un rol muy importante en la disolución de los carbonatos. El aumento de la concentración de CO_2 incrementa la acidez del suelo, por lo que existe una relación inversa entre el pH y la disolución de carbonatos, como puede verse en la Figura 2.

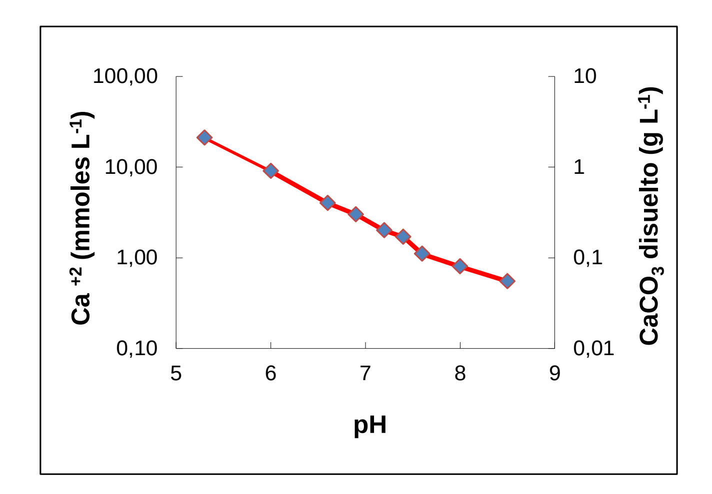


Figura 2. Efecto del pH sobre la solubilidad del $CaCO_3$ (Adaptado de Zapata, 2006).

De la misma manera el aumento de la temperatura afecta la disolución de los carbonatos. Su solubilidad decrece con el aumento de la temperatura. Cuando la temperatura disminuye de 25 a 10ºC, la solubilidad se incrementa en más de 150%.

La mineralización de la materia orgánica es otro factor que puede afectar la lixiviación de Ca^{+2} y Mg^{+2}. Este proceso produce NH_4^+, el que en suelos con adecuada aireación, se oxida a NO_3^-. Esta reacción libera H^+, que puede intercambiarse con el Ca^{2+} y/o Mg^{2+} en los sitios de adsorción de los coloides del suelo y por lo tanto afectar la lixiviación de estos cationes.

Las condiciones que propician tanto la solubilización de carbonatos (CO_2, temperatura, pH) como la mineralización de la materia orgánica, son predisponentes a la lixiviación de bases en vastas áreas de la Región Pampeana. En las mismas, el régimen hídrico sub-húmedo/húmedo, la alta presión biológica y la condición templada, provoca que su lixiviación pueda ser alta, especialmente en condiciones de buen drenaje.

La estructura química de ambos elementos influye su dinámica en el suelo. El Ca es un ion relativamente grande (0,412 nm), con una energía de hidratación de 1.577 J mol^{-1}, mientras

que el Mg tiene un tamaño de 0,428 nm y su energía de hidratación es de 1.908 J mol^{-1}. La bivalencia del Ca y una capa de hidratación relativamente delgada, hacen que este elemento sea adsorbido fuertemente por los diferentes tipos de minerales de arcilla. En suelos en los que dominan las arcillas de tipo 2:1, entre el 60 y el 80% de la CIC está saturada con Ca y entre el 10 al 20 % con Mg. En otros con predominio de arcillas de tipo 1:1, estas cifras suelen ser considerablemente menores, oscilando en valores de alrededor del 20% para ambos cationes. A título de ejemplo, en la Tabla 2 pueden observarse los contenidos típicos de Ca y Mg intercambiables y otras propiedades para diferentes suelos argentinos.

Tabla 2. Reacción (pH), capacidad de intercambio catiónica (CIC) y bases de intercambio de horizontes superficiales en suelos argentinos (datos obtenidos de Cartas de suelo de INTA).

Ubicación	**Taxonomía**	**Serie**	**pH**	**CIC**	**K**	**Ca**	**Mg**
				------- $cmol_c$ kg^{-1} -------			
SO Santa Fe	Argiudol Típico	El Cantor	6,1	15,3	2,6	9,4	1,7
Misiones	Haplortox Epiácuico	Alem	4,4	10,7	0,3	1,0	0,9
Buenos Aires	Natracuol Típico	Los Indios	7,6	17,2	1,7	10,6	2,5
N Buenos Aires	Argiudol Típico	Rojas	6,0	18,1	1,8	11,1	2,9
O Buenos Aires	Hapludol Éntico	Belloq	5,6	13,1	2,2	7,2	2,3
Centro E Buenos Aires	UdipsammentTípico	El Mirador	5,8	7,4	1,0	3,0	0,4
Centro Santa Fe	Hapludalf Acuico	Coronda	6,8	4,8	0,5	3,2	0,2
Chaco	Ustifluvent Mólico	Límite	7,3	14,5	2,7	10,3	2,4
Chaco	Haplustol Údico	Ñaró	6,7	18,0	2,5	13,3	2,6
Córdoba	Natracualf Mólico	San Francisco de Asís	6,0	16,8	2,9	8,8	1,4
San Luis	Haplustol Típico	Arroyo La Barranquita	7,5	22,8	2,5	15,3	2,4
La Pampa	Haplustol Entico (petrocálcico)	Alpachiri	6,8	15,4	2,8	11,1	0,1

En algunas regiones, las deposiciones atmosféricas líquidas y sólidas pueden ser de relativa importancia para contrarrestar lo exportado por los cultivos y las pérdidas por lavado. Hedin *et al.* (1994) estimaron valores de deposición atmosférica de Ca en Suiza, el NE de los EEUU y Holanda de 0,5; 1,0 y 4,2 kg ha^{-1} $año^{-1}$ de Ca, respectivamente. Un resumen de los factores que condicionan la disponibilidad de estos elementos puede verse en la (Caja 1).

Caja 1: Factores que condicionan la disponibilidad de Ca y Mg en los suelos:

- Material parental y procesos pedogenéticos
- pH del suelo
- Capacidad de intercambio catiónico
- Porcentaje de saturación de estos cationes en la CIC
- Tipo de arcillas
- Transformaciones biológicas

- Relación entre el contenido de Ca^{2+} y Mg^{2+} y con respecto a otros cationes
- Pérdida por lavado y remoción de los cultivos
- Reposición vía atmosférica por sedimentación y ascenso de napas
- Fertilización y encalado

2.2. Fisiología de la nutrición, absorción y translocación. Síntomas de deficiencia.

Las revisiones bibliográficas de Pooviah y Reddy (1996) entre otras, permiten profundizar en los roles de estos nutrientes en las plantas. Como se ha mencionado, los suelos pueden contener cantidades muy variables de Ca y Mg, lo que ha conducido, a través de la selección natural de las especies vegetales, a características genéticas adaptadas a un amplio rango de condiciones. Existen especies calcícolas, típicas de suelos básicos de zonas áridas, otras calcífugas, características de condiciones tropicales, con reducida cantidad de bases en general y por lo tanto de carácter ácido, y otras denominadas ubicuistas, por adaptarse a una amplia escala de condiciones de provisión de Ca y otras bases. Las especies calcícolas poseen mecanismos de control interno de los tenores de Ca, con estrategias de acumulación de este ion en forma intracelular, precipitado como malato u oxalato. La adaptación de las plantas a suelos de estas características puede estar asociada a otras variables relacionadas. Por ejemplo, en suelos de pH elevado por altos tenores de Ca, el contenido de metales pesados solubles puede ser bajo y por ende favorecer el desarrollo de las plantas. En estos suelos, la concentración de otros nutrientes básicos puede ser mayor y la fijación biológica de N estaría favorecida. Especies exigentes en Fe, difícilmente se adapten a suelos básicos, donde la disponibilidad en solución de este elemento disminuye drásticamente por transformación del mismo a formas precipitadas a pH mayor a 7, independientemente del potencial redox.

Las plantas superiores contienen cantidades de Ca comprendidas entre 1-50 g kg^{-1} (0.1-5%) de materia seca, dependiendo de la especie, el órgano y las condiciones de crecimiento. Estos valores se alcanzan con altos contenidos de este elemento en la solución del suelo, más que por la especificidad en la absorción de los vegetales. El Ca sólo puede absorberse a través de los ápices de las raíces más jóvenes, donde la endodermis aún no se ha suberizado. Otros cationes como el Na^+, H^+, K^+, NH_4^+ y Al^{3+}, interactúan negativamente con su absorción. Por ejemplo, cuando el pH es bajo, se requiere proporcionalmente mayor cantidad de Ca^{2+} en la solución para contrarrestar el efecto adverso de los protones en la elongación radical, así como el requerido para la nodulación y fijación de N.

El principal proceso que conduce el Ca a las raíces es el flujo masal, derivado de la demanda de agua de la planta. Una vez ingresado a la planta, se transporta mayoritariamente a través del apoplasto o espacio libre. El mecanismo de absorción y translocación es, por lo tanto, pasivo y regulado por la corriente transpiratoria y la presión radical (Azcon Bieto y Talon, 2008). Generalmente las monocotiledóneas son menos exigentes que las dicotiledóneas, especialmente las leguminosas, aunque existen excepciones a esta regla.

Una gran proporción del Ca se encuentra formando parte de las paredes celulares de estructuras rígidas, como oxalato de Ca y otros ácidos orgánicos en el apoplasma o las vacuolas. Dentro de sus principales funciones puede citarse el mantenimiento de la integridad de las membranas, la estabilidad de las paredes celulares, gravitropismo de raíces y tallos, la deposición de callosa y la regulación de varias enzimas, entre ellas α-amilasa, proteino quinasas y ATP-asas.

Los síntomas de deficiencia de Ca en las plantas generalmente se concentran en tejidos meristemáticos (áreas de activo crecimiento y división celular) de hojas, tallos y raíces. Esto se debe a la relativamente baja movilidad de este elemento dentro de la planta, lo que determina una baja tasa de removilización hacia tejidos jóvenes de rápido crecimiento (Azcon Bieto y Talon, 2008). La deficiencia de Ca causa deformaciones en los tejidos y muerte de los puntos de crecimiento incluyendo yemas, flores y puntas de raíces. Los ápices y márgenes de las hojas se tornan cloróticos y/o necróticos. Las leguminosas deficientes en Ca presentan un escaso desarrollo radical con reducida capacidad de fijación de N (nódulos blancos). La baja tasa de absorción de Ca^{+2} combinada con una limitada translocación de carbohidratos puede causar distintos síntomas en frutos y vegetales. Ejemplos de estos síntomas son la enfermedad llamada podredumbre apical (*blossom end rot*) en tomate y pimiento, deformaciones en melón, producción de sabor amargo en manzano (*bitter pit*), mancha marrón en el interior del fruto de tomate, corazón negro en maní y ajo, y ahuecamiento en zanahoria, entre otras. Generalmente la firmeza de los frutos se ve reducida ante deficiencia de Ca lo que disminuye significativamente el tiempo de consumo y trazabilidad.

Los síntomas de deficiencias no siempre se dan con bajos tenores de Ca en el suelo, puede ocurrir que una corriente transpiratoria inadecuada para translocar las cantidades necesarias de este elemento a las plantas sea el origen del problema, especialmente en los órganos de baja tasa transpiratoria como los frutos. Una baja demanda atmosférica, suelos salinos, lento crecimiento de ápices radicales responsables de la absorción, por ejemplo por baja temperatura, pueden ser causas de un pobre suministro de Ca a la planta, debido a la disminución de la corriente transpiratoria.

El Mg está contenido en tejidos vegetales en cantidades de alrededor de 5 g kg^{-1} (0.5%) de materia seca. El transporte al interior de la planta es pasivo, mediado por las ionóferas, que son moléculas orgánicas que transportan los iones a través de las membranas biológicas, mediante la formación de complejos liposolubles con cationes polares. La absorción de Mg se hace en la forma de ion divalente y está afectada por la presencia de otros iones que compiten por las ionóferas, tales como K^+, NH_4^+, Ca^{2+} e H^+. Andrade *et al.* (2003) informaron acerca del efecto de la saturación básica y la composición catiónica en la absorción de ciertos elementos, entre ellos los metales pesados en situaciones de contaminación. En contraste con el Ca^{2+}, el Mg^{2+} es muy móvil en el floema y puede ser translocado desde las hojas maduras a las más jóvenes y a los ápices. La función fisiológica de mayor trascendencia del Mg es la de formar parte de la molécula de clorofila, aunque no es el destino más importante desde el punto de vista cuantitativo, ya que sólo del 15 al 20% del Mg en el vegetal está ligado a la clorofila. El resto se encuentra localizado en forma iónica soluble en el espacio intratilacoidal y al iluminarse el cloroplasto pasa al estroma, donde activa enzimas como la rubisco, la fosfo-enolpiruvato carboxilasa y la glutamato sintasa. La asignación fotosintética del C y el N, depende en gran medida, de la concentración de Mg en el cloroplasto (Azcon Bieto y Talon, 2008). Cuando una planta es deficiente en Mg, disminuye el N proteico y aumenta el no proteico, por su efecto sobre las partículas ribosomales. Este hecho permite utilizar la medida del N no proteico soluble como índice de la deficiencia de Mg. Una sustancial proporción de este elemento está involucrada en la regulación del pH celular y el balance catión-anión. El Mg también interviene en el metabolismo energético de la planta al formar complejos con el ATP, estos permiten la fosforilación del ADP para transformarse en ATP.

Si bien los síntomas de deficiencia de Mg varían de una especie a otra, existen algunas características generales que pueden citarse. A diferencia del Ca, los síntomas de deficiencia de

Mg se concentran en las hojas inferiores debido a la alta movilidad de este nutriente dentro de las plantas, lo que determina una activa movilización ante situaciones de deficiencia. Se producen clorosis internervales a causa de la menor fotosíntesis y acumulación de carbohidratos, ya que las células del mesófilo próximas a la nervadura conservan la clorofila por más tiempo (Azcon Bieto y Talon, 2008). Finalmente, puede producirse necrosis en los casos más severos, empezando por las hojas maduras y avanzando hacia las más nuevas, a causa de su retranslocación vía floema. Las hojas se tornan rígidas y quebradizas, y suelen caer prematuramente. En el caso de los cereales, la base de las hojas muestra pequeñas manchas verde oscuro que se destacan sobre el resto del limbo, verde pálido amarillento. Finalmente se necrosan las puntas de las hojas. Los órganos de almacenamiento, tales como tubérculos o granos de cereales, pueden acumular menores cantidades de carbohidratos.

3. Requerimientos de los cultivos

Los requerimientos y/o exportación de Ca y Mg de diferentes cultivos se muestran en la Tabla 3. Los valores de exportación de estos nutrientes son sumamente variables, alcanzando cifras cercanas a 200 kg ha^{-1} en el caso de Ca y 50 kg ha^{-1} en el de Mg, dependiendo de la especie y los rendimientos. La producción hortícola es sumamente exigente en estos elementos y es en suelos bajo este tipo de producción donde generalmente se reportan los balances más negativos. En un estudio realizado por Balcaza (2003), se evaluó la evolución del Ca intercambiable en suelos de invernáculos del Gran La Plata y se informó una disminución de 12,8 a 7,1 $cmol_c$ kg^{-1} de Ca, en 12 años de producción.

Tabla 3. Requerimientos y/o exportación de Ca y Mg para diferentes cultivos.

Especie	**Rendimiento**	**Requerimiento**		**Exportación**		**Referencia**
		Ca	**Mg**	**Ca**	**Mg**	
Cereales,oleaginosas y cultivos industriales	t ha^{-1}	--------------- kg ha^{-1} ---------------				
Maíz	9	27	27	2	8	Andrade
Trigo	5	15	15	2	8	*et al.* (1996)
Arroz	6	17	14	1	6	Malavolta
Soja	4	64	36	12	11	*et al.* (1989)
Girasol	3,5	63	39	5	11	
Caña de azúcar	75	-	-	31	26	
Tabaco	2,2	-	-	83	20	
Cultivos hortícolas	t ha^{-1}			----- kg ha^{-1} -----		
Lechuga	45			37	7-13	Balcaza
Repollo	83			16	8	(1996)
Tomate	40			52	-	Figueroa
Pimiento rojo	40			52	-	y Torres
Pepino	150			-	60-150	Dugan
Cebolla	35			28	6	(2002)

Frutilla	40			-	16-20	Maroto
Melón	70			-	70-175	(2002)
Apio	60			-	24-60	Calderón
						(2008)
Frutales		--------------- kg t^{-1}---------------				
Durazno		0,8	-	0,2	0,3	Ciampitti
Pera		5,8	0,5	0,3	0,2	y
Manzana		4,6	0,9	0,6	0,1	García
Uva		5,8	1,0	2,7	0,7	(2008)
Limón		-	-	0,7	0,2	
Mandarina		-	0,6	0,7	0,2	
Naranja		-	0,7	1,0	0,4	
Pomelo		-	-	0,4	0,1	
Pasturas		--- kg t^{-1} MS ---				
Alfalfa		11-13	2-4			Ciampitti
Pasto ovillo		-	2			y
Festuca		5	2			García
Raigrás		5-6	2			(2008)
Sorgo forrajero		-	1			
Gramilla		-	0,6			

4. Diagnóstico de la fertilidad cálcica y magnésica

4.1. Métodos de análisis de suelo

El diagnostico del nivel de Ca y Mg de los suelos ha estado tradicionalmente relacionado a determinaciones de pH y necesidades de encalado, ya que bajos niveles de pH están asociados con probables deficiencias de estos cationes. Pese a ello se han desarrollado metodologías con el objetivo de evaluar específicamente el contenido de Ca y Mg en los suelos en situaciones donde la acidez no es el problema principal. El método más ampliamente utilizado para determinar si los niveles de Ca y Mg de un suelo son suficientes para cubrir las necesidades de un cultivo, es el muestreo y análisis de suelo. Generalmente se recomienda tomar muestras de suelo en áreas lo más homogéneas posible, a la profundidad a la cual las calibraciones de ambos nutrientes fueron desarrolladas (generalmente 0-20 cm). En el laboratorio, las formas solubles e intercambiables de ambos cationes son extraídas con diferentes soluciones extractantes, generalmente acetato de amonio a pH 7 1N, y su concentración es determinada con espectrofotometría de absorción/emisión atómica o titulación. Una vez obtenidos los valores de concentración de ambos nutrientes en el suelo, se los compara con umbrales críticos desarrollados local o regionalmente para el cultivo de interés y se decide la conveniencia de efectuar una aplicación de estos elementos, utilizando, preferentemente las recomendaciones zonales. Por ejemplo, en la Tabla 4 se presentan los rangos de Ca y Mg intercambiables sugeridos como óptimos para el crecimiento del maíz en suelos Molisoles del estado de Wisconsin, EEUU. Se recomienda la aplicación de estos nutrientes cuando los niveles en el suelo son inferiores a estos valores.

Tabla 4. Niveles óptimos de Ca y Mg intercambiables para maíz para dos clases texturales de suelos de Wisconsin, EEUU (Bundy, 2004).

	Textura del suelo	
Nutriente	**Arenoso**	**Franco**
	-------------- mg kg^{-1} --------------	
Ca	400-600	600-1000
Mg	50-250	100-500

En algunos casos estas evaluaciones de valores absolutos se enmarcan, para un diagnóstico más ajustado, en la saturación básica del suelo ((S=∑Ca, Mg, K, Na intercambiables/CIC)*100), considerándose valores apropiados entre el 60-85%.

Además de la determinación de los contenidos absolutos de las formas intercambiables de Ca^{+2} y Mg^{+2} en el suelo, se han propuesto determinaciones de las cantidades relativas de estos cationes. En la década del 50 se desarrollaron algunos criterios relativos con fines de diagnóstico a nivel intensidad (elementos en solución), mediante el empleo de potenciales químicos (expresión logarítmica de la actividad de los iones). Algunos de los potenciales relativos empleados fueron los siguientes:

Potencial potasio-calcio: pK – 0,5 pCa
Potencial potasio-magnesio: pK – 0,5 pMg
Potencial potásico-cálcico-magnesio: pK – 0,5 p(Ca + Mg)

La dificultad analítica de la medición de la solución del suelo ha hecho que estas medidas quedaran confinadas prácticamente a la investigación. Sin embargo, en la actualidad son empleadas en cultivos intensivos, particularmente en invernáculos con fertirriego, a partir de la solución edáfica obtenida mediante extractores que se dejan colocados en el suelo para un monitoreo periódico.

La evaluación más ampliamente difundida en el orden internacional y nacional con fines de diagnóstico es la concentración de estos elementos en forma intercambiable en los coloides (materia orgánica, arcillas, óxidos). En este sentido, el índice más difundido es el porcentaje de cada catión con respecto a la saturación básica del suelo (suma de bases intercambiables), concepto desarrollado originalmente por Bear y Toth (1948) y luego suscripto por numerosos autores, entre ellos, Zalewska (2003; 2005). De esta manera se propuso el concepto de una "relación ideal" entre algunos de los cationes que se encuentran adsorbidos a la CIC del suelo. Esta relación sugerida originalmente fue de 65% de Ca, 10% Mg, 5% de K y 20% de hidrogeno (H). Dicho concepto fue desarrollado luego de 8 años de trabajo en alfalfa en suelos de Nueva Jersey, EEUU. Si bien esta idea de una relación ideal entre cationes ha sufrido severas críticas por parte de muchos investigadores desde su aparición, actualmente se la considera como parcialmente válida y existen ciertos resultados en la bibliografía donde se ha señalado su utilidad para diagnosticar deficiencia de algunos cationes para la nutrición vegetal. Se aceptan, en términos generales, saturaciones de cada uno de los nutrientes básicos respecto a la suma total de bases del orden de 65-85% de Ca, 6-12% de Mg y 2-5% de K.

Debe advertirse, sin embargo, que la evaluación de la saturación básica en su conjunto, como la de Ca, Mg o K en particular, empleando el método del acetato de amonio 1N pH 7,

ampliamente difundido en el mundo y en Argentina, puede conducir a errores en el diagnóstico. La regulación a pH 7 en un suelo ácido, provoca un aumento artificial de la CIC, a través del aumento de las cargas variables de los coloides del suelo, resultando en porcentajes de saturación de estas bases bajos pero irreales. Es por este motivo que en suelos ácidos o tratados con correctores básicos deben utilizarse para la evaluación de la CIC, técnicas analíticas sin bufferación, poco difundidas en Argentina. Millán *et al*. (2010) evaluaron este efecto para suelos del ámbito pampeano, corroborando el hecho. Bajo este principio se propone utilizar en lugar de la CIC, la denominada capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) determinada con cloruro de potasio (KCl 1 N), siendo:

$$\text{CICE} = \sum \text{Ca, Mg, K, Na, Al}$$
$$\text{Saturación de bases (\%)} = (\sum \text{Ca, Mg, K, Na}) * 100/\text{CICE}$$

Zalewska (2008) informó que para girasol, la saturación óptima seria de 60% de Ca, 8,4 % de Mg y 4,2% de K. Saturaciones potásicas por debajo de 3% y por encima de 8% resultarían en considerables reducciones de rendimiento. La autora establece que la relación de saturación de Mg:K debe ser del orden de 2:1 para maximizar el rendimiento de este y otros cultivos (Zalewska 2003, 2005). Cabe destacar, sin embargo, que estos valores pueden cambiar considerablemente con la naturaleza coloidal en distintos suelos. Por ejemplo, Kamprath (1984) concluyó a través de un número de estudios, que saturaciones cálcicas de 20-30%, con 1 $cmol_c$ kg^{-1} de Ca intercambiable en suelos altamente meteorizados, dominados por caolinita y óxidos, fueron suficientes para la nutrición de la mayoría de las especies. Esto demuestra que las cifras citadas, son sólo orientativas, y en principio, no válidas para suelos muy evolucionados de ambientes subtropicales/tropicales.

La saturación de cada uno de estos cationes en el complejo de intercambio, redunda en relaciones particulares entre los elementos básicos. Si bien no existen calibraciones regionales en el país y considerando que es común encontrar variación de los umbrales según otras condiciones edafo-climático-culturales, pueden, sólo a título de ejemplo, citarse algunos criterios de diagnóstico elaborados partir de una amplia revisión bibliográfica (Tabla 5).

Tabla 5. Umbrales críticos orientativos de relaciones entre cationes intercambiables.

Relación de cationes intercambiables	**Umbral crítico** ---- relación en $cmol_c$ kg^{-1}----
Ca+Mg/K	7-11/1
Ca/Mg	3-15/1
Ca/K	13/1

Un valor superior a estos umbrales indicaría deficiencias relativas de los elementos del denominador. Por ejemplo, altos niveles de K a causa de un elevado contenido de micas e illita en la fracción mineral en el suelo, provocarían deficiencias inducidas de Ca y particularmente Mg. Esta situación está presente en muchas áreas de la Región Pampeana. Otros factores como baja temperatura, baja disponibilidad de P y condiciones de saturación hídrica, son predisponentes a estas deficiencias. De manera similar, este fenómeno puede producirse debido a altas dosis de fertilización potásica, las que suelen conducir a deficiencias relativas de Ca y Mg, aún en situaciones de adecuados contenidos de estos elementos en el pool intercambiable. Este

hecho ha sido registrado en tabaco, caña de azúcar, papa y cebada. Darwich (2006) informó que la relación Ca/Mg no debe ser superior a 7/1. Así mismo, la relación K/Mg intercambiable es utilizada para decidir la fertilización magnésica en las siguientes situaciones (Tabla 6):

Tabla 6. Diagnóstico de la fertilidad magnésica a partir de la relación K/Mg.

Relación K/Mg en		**Necesidad de fertilización**
mg 100 gr^{-1}	$cmol_c$ kg^{-1}	
5	1,5	Cultivos extensivos
3	1,0	Hortalizas
2	0,6	Cultivos intensivos, de invernáculo y frutales

La relación K/Mg también se ha utilizado para identificar situaciones de hipomagnesemia o tetania de los rumiantes (Moseley y Baker, 1991). En general con valores de K/Mg superiores a 0,8 – 1,6/1 (en peso) en el suelo, es esperable esta alteración nutricional en animales que se alimentan mediante pasturas que crecen en estas condiciones. Concentraciones de Mg en forrajes menores a 2 g kg^{-1} y relaciones K/Ca+Mg mayores a 2,2, son factores predisponentes al problema. Según Darwich (2006) la relación K/Mg óptima para hortalizas, expresada en $cmol_c$ kg^{-1}, se encuentra entre 1-1,5. En algunos suelos del SE bonaerense, el alto nivel de K intercambiable interfiere con la absorción de Mg (Darwich, 2006). De igual manera fue citada la deficiencia relativa de Mg a causa de elevados tenores de Ca para otros ámbitos de la Región Pampeana (Culot, 1967). En la producción hortícola/florícola del Gran La Plata se utilizan frecuentemente los criterios de relaciones entre cationes intercambiables señalados en la Tabla 7.

Tabla 7. Diagnóstico de situaciones de deficiencia y suficiencia para diferentes cultivos mediante las relaciones entre cationes en la solución del suelo (Balcaza, comunicación personal).

Relaciones	**Valor**	**Consideración**
	--- meq l^{-1} ---	
K/Ca+Mg	0,4 a 0,6	Normal
K/Mg	0,25	Normal para tomate y pimiento
	>0,5	Probable deficiencia de Mg en tomate y pimiento
	0,35	Normal para pepino y melón
	>0,6	Probable deficiencia de Mg en pepino y melón
K/Ca	0,17	Normal para tomate y pimiento

	>0,4	Probable deficiencia de Ca en tomate y pimiento
	0,34	Normal para pepino y melón
Ca/Mg	1,5	Normal para tomate y pimiento
	< 1	Probable deficiencia de Ca. (*Blossom end rot*)

El problema principal que presenta este tipo de índices relativos es que su empleo puede derivar en conclusiones erróneas respecto a la suficiencia de ambos nutrientes. Esto ocurre porque una misma relación puede significar deficiencia o suficiencia de ambos nutrientes. Por ejemplo, si se consideran dos suelos, uno con 100 mg kg^{-1} de Ca^{+2} y 20 mg kg^{-1} de Mg^{+2} y otro con 300 mg kg^{-1} de Ca^{+2} y 60 mg kg^{-1} de Mg^{+2}, ambos presentan la misma relación Ca/Mg. Sin embargo, el primer suelo seguramente será deficiente en ambos cationes mientas que el segundo presentará niveles adecuados de Ca y Mg para el crecimiento de la mayoría de las plantas. Es por esta razón que estas relaciones son evaluaciones complementarias a las de los valores absolutos para un correcto diagnóstico.

La literatura internacional es controvertida en el empleo de la saturación de las diferentes bases como elemento de diagnóstico. Varios autores, entre ellos Oliveira y Parra (2003), demostraron que grandes variaciones en la saturación de estos cationes tuvieron poca influencia sobre el rendimiento de especies cultivadas. De la misma manera, otros autores como Oliveira (1993), desestimaron el empleo de la relación Ca/Mg con este fin. Sin embargo varias investigaciones, entre ellas las de Muñoz Hernández y Silveira (1998), Büll *et al.* (1998), Anjos Reis *et al.* (1999), Borie *et al.* (1999), Demanet *et al.* (1999) y Loide (2004), por el contrario, verificaron la importancia de la saturación particular de estos cationes y sus relaciones, en el desarrollo de otras especies. Estos resultados permitirían concluir que el diagnóstico de suficiencia/deficiencia de los nutrientes básicos, debe ser calibrado para cada ambiente y cultivo a desarrollar, no pudiendo hacerse generalizaciones en este sentido, si bien los datos bibliográficos pueden servir de orientación para situaciones de cultivo/suelo comparables.

4.2. Métodos de análisis de material vegetal

En cultivos intensivos y extensivos perennes, es común que el análisis del tejido vegetal sea una herramienta valiosa para el diagnóstico de Ca y Mg, así como de otros elementos. Esto se debe a que la respuesta de un cultivo de estas características no sólo está relacionada con la situación actual de la disponibilidad del nutriente en el suelo, sino también con su historia de crecimiento, que por ejemplo le confiere una cierta estructura radical y por ende capacidad de explorar suelo y captar nutrientes, estado sanitario, vigor, entre otras cosas. A modo de ejemplo se ilustran en la Tabla 8 los momentos, órganos a muestrear y los valores de suficiencia con fines de diagnóstico en algunas especies hortícolas.

Tabla 8. Momento, órgano de muestreo y valores de suficiencia de Ca y Mg para algunas especies hortícolas y frutícolas de importancia. (Adaptado de Malavolta *et al.*, 1989;

Sanchez, 1996; Melgar *et al.*, 1999; Figueroa y Torres Duggan, 2002; INIA, 2006; Sánchez, 2007; Calderón Sáenz, 2008).

Cultivo	Momento de muestreo	Parte a muestrear	Concentración en planta	
			Ca	Mg
			------------ % -----------	
Hortícolas				
Lechuga	Formación de la cabeza	Hojas maduras jóvenes	1,25	0,35
Zanahoria	Mitad del ciclo	Nervadura principal de hojas maduras jóvenes	2,25	0,35
Coliflor	Botonamiento	Nervadura principal de hojas maduras jóvenes	1,50	0,40
Espinaca	Mitad del ciclo	Hojas maduras jóvenes	1,00	1,00
Pimiento	Floración	Hojas maduras jóvenes	2,50	0,75
Tomate	Floración o 1er fruto maduro	4º hoja a partir del ápice	3,00	1,00
Cebolla	Antes de la expansión del bulbo	Hojas centrales jóvenes	0,52	0,33
Frutales				
Pera		Hojas	1,1-2,5	0,24-0,50
Manzano		Hojas	1,1-2,5	0,24-0,60
Duraznero		Hojas	1,1-3,0	0,24-0,80
Ciruelo		Hojas	1,1-3,0	0,24-0,80
Cerezo		Hojas	1,1-2,5	0,24-0,60
Uva		Hojas	1,1-2,5	0,50-0,80
Naranjo		Hojas	3,0-6,0	0,30-0,60

5. Fertilización de cultivos con Ca y Mg

5.1. Intensivos

La fertilización con Ca y Mg se hace regularmente en los cultivos bajo cubierta. La aplicación de estos nutrientes puede realizarse de varias formas. También se los aplica como enmiendas, ya sea bajo la forma de calcita, dolomita o yeso, este último en suelos con altos niveles de Na. Existen fertilizantes que se aplican al suelo como lignosulfonato y quelato de Ca. Además, en fertirriego de especies ornamentales u hortícolas se suele usar como $(NO_3)_2Ca$ en cantidades variables según cultivo y etapa fenológica. A título de ejemplo se presentan las dosis de Ca y Mg generalmente recomendadas para diferentes especies en la Tabla 9.

Tabla 9. Concentraciones de Ca y Mg, y dosis de $(NO_3)_2Ca$ y $SO_4Mg.7H_2O$ recomendadas para fertirrigación de cultivos hortícolas y florales (Balcaza, comunicación personal).

Cultivo	Estado fenológico	Ca^{+2}	Dosis de $(NO_3)_2Ca$	Mg^{+2}	Dosis de $SO_4Mg.7H_2O$

		mg kg^{-1}	g m^{-3}	mg kg^{-1}	g m^{-3}
Tomate (fertirrigación continua)	Etapa vegetativa	20 a 30	150 a 220	10 a 20	160 a 320
	Etapa reproductiva (floración)	30 a 40	220 a 300	20 a 30	320 a 500
	Etapa reproductiva (cuaje)	40 a 50	300 a 400	30 a 40	500 a 650
	Etapa reproductiva (cosecha)	30 a 40	220 a 300	20 a 30	320 a 500
Pimiento (fertirrigación continua)	Transplante - Floración	15 a 20	110 a 150	5 a 10	80 a 160
	Floración - Cuaje	30 a 40	220 a 300	20 a 30	320 a 500
	Cuaje - Cosecha	40 a 50	300 a 400	25 a 35	415 a 580
	Cosecha	30 a 40	220 a 300	20 a 30	320 a 500
Lechuga	A partir de la 3^{a} semana (1 vez x semana)	50 - 60	370 a 440	10 a 20	160 a 320
Rosa (fertirrigación semanal)	Etapa vegetativa	60 - 80	440 a 590	15 a 20	250 a 320
	Etapa reproductiva	50 - 60	370 a 440	10 a 15	160 a 250

El Ca y el Mg también pueden aplicarse como quelatos en forma foliar. La absorción foliar del Ca por parte de las hojas es relativamente lenta, el 50% del Ca agregado puede demorar de 1 a 2 días (Romheld y El-Fouly, 2001). Por el contrario, la absorción foliar de Mg es muy rápida, generalmente las plantas pueden absorber el 50% del Mg aplicado entre de 2 a 5 h después de la aplicación. Existen diferentes productos para este tipo de fertilización. En general, el Ca se aplica en concentraciones de 200 a 300 g 100 l^{-1}. En algunos programas se utiliza el $(NO_3)_2Ca$ foliar complementando el que se aplica por fertirriego. Las concentraciones más comunes son: 300 a 450 g 100 l^{-1} de agua en la etapa reproductiva (Balcaza, comunicación personal). En cuanto al Mg, las aplicaciones pueden hacerse antes de la preparación del suelo, por ejemplo con $SO_4Mg.7H_2O$, en caso de situaciones de deficiencia, sin embargo, la fertirrigación es la práctica más difundida. Si bien estas dosis sugeridas son de uso bastante generalizado, es conveniente hacer un seguimiento de la solución del suelo a lo largo del ciclo del cultivo y evaluar en ella si las relaciones catiónicas se asemejan o no a las consideradas normales (Tabla 7).

Piaggio y Costa (1996) sugieren para la fertilización en estadios iniciales de tomate y pimiento una relación N:P:K:Mg:Ca:S de 1:0,4:1,5:0,1:0,5:0,1; mientras que cuando inicia la cosecha la relación aconsejada es 1:0:2,9:0,11:0,6:0,2. Silva y Larraín (1997) aconsejan 5 aplicaciones foliares de 1,5 kg ha^{-1} de Ca cada una, ya sea como cloruro, nitrato o fosfato, desde el estadío de frutos de 2,5 cm hasta 15 días antes de la cosecha, para reducir el efecto de *bitter pit* en manzano. Sin embargo, esta práctica debe acompañarse de otras condiciones de manejo referidas a niveles y momento de fertilización con otros nutrientes, podas y tratamientos poscosecha. Widmann (2002) comprobó que la aplicación de una fertilización mediante un complejo conteniendo 12% N, 12% P, 17% K y 2% Mg, a razón de 712 kg ha^{-1}, produjo un incremento de la producción del 22% en naranjos en Corrientes. Vigil (2002) señala la importancia de lograr ciertas relaciones K/Mg en pecíolos y hojas de vides mendocinas vía

fertilización, ya que las mismas afectan el desarrollo vegetativo, las características físico-químicas de las bayas, así como las características del mosto y el vino resultante. Se señala que la relación K/Mg foliar óptima en floración es 2,44.

En los valles regados por los ríos Mendoza, Tunuyán, Diamante, Atuel y Malargüe en Mendoza, se registran algunos cultivos, como por ejemplo ciertos híbridos de tomate para mercado, en los cuales se fertiliza abundantemente con K. Esto suele provocar deficiencias inducidas de Mg que se tratan con aplicaciones de SO_4Mg foliar. Otro problema que se presenta en la región es la podredumbre apical causada por la deficiencia de Ca en el extremo de los frutos. Este problema es motivado en la región, principalmente, por condiciones atmosféricas muy extremas, alta temperatura, muy baja humedad y fuerte viento (Zonda). Fertilizaciones con dosis muy elevadas de N, pueden incrementar la incidencia de este disturbio fisiológico (Lipinsky, comunicación personal).

5.2. Extensivos

La fertilización cálcico/magnésica en cultivos extensivos está menos desarrollada que en los cultivos intensivos. En general el inadecuado suministro de estos elementos está asociado a la acidificación del suelo, problemática que se trata mediante el encalado. Esta práctica utiliza productos naturales como la caliza ($CaCO_3$) y la dolomita ($MgCO_3/CaCO_3$), entre los más difundidos, para la corrección de la acidez, incorporando Ca y Mg por esta vía. En ámbitos de reducida acidez, estos productos pueden utilizarse en bajas dosis, transformando la enmienda cuyo objetivo es corregir la acidez, en una fertilización, con el propósito de aportar Ca y Mg. Sin embargo existen fertilizantes de aplicación al suelo y foliares que contienen estos nutrientes.

A nivel nacional existen algunas experiencias donde se evaluó la respuesta de varios cultivos a fertilizaciones con Ca y Mg. Gambaudo *et al.* (2007) utilizaron 3 fertilizantes preparados a partir de compuestos minerales naturales, con aproximadamente 21-24% de Ca, y 8-9 % de Mg, además de S, Zn y Mn. Estos productos fueron aplicados en un cultivo de soja en 3 situaciones de la zona centro de Santa Fe, con dosis de 100-120 kg ha^{-1}, obteniéndose incrementos de rendimiento de hasta 1000 kg ha^{-1}. Martínez y Cordone (2008) evaluaron la respuesta al agregado de P, S y Mg del cultivo de soja en las Series Peyrano y Casilda del sur de Santa Fe. En esta experiencia, la fertilización magnésica se realizó con kierserita a una dosis de 11 kg ha^{-1} de Mg, y se observaron incrementos promedio de aproximadamente 150 kg de grano, por sobre el tratamiento con agregado de P y S. Vivas y Fontanetto (2003) verificaron en el centro de la Pcia. de Santa Fe, Dto. de San Justo, incrementos de rendimiento de soja del orden de 300 kg ha^{-1}, con el agregado de 100 kg ha^{-1} de calcita micronizada y aperdigonada (Ca= 37%). Dosis superiores, 200-300 kg ha^{-1} del mismo producto, no provocaron incrementos de rendimiento adicionales. Melgar *et al.* (1999) observaron un incremento de 35% en el rendimiento de alfalfa en las localidades bonaerenses de 25 de Mayo y Pergamino, mediante el agregado de 30, 20 y 20 kg ha^{-1} de K, S y Mg (como MgO), respectivamente. Los dos suelos poseían relaciones 1,8 y 2,2 K/Mg, lo que indicaría posibilidad de respuesta a Mg, aspecto que se condijo con reducidos contenidos foliares de este elemento. El tratamiento mencionado superó en respuesta a las aplicaciones aisladas de estos elementos. Vivas *et al.* (2001) utilizaron un fertilizante granulado con 51% de $CaCO_3$ y 37% de $MgCO_3$, aplicado en dosis de hasta 600 kg ha^{-1} en maíz en suelos del centro de Santa Fe de pH 5,4 y 5,9 y bajos contenidos de Ca. Los

resultados mostraron incrementos del rendimiento cercanos a los 1000 kg ha^{-1}, con dosis de entre 400-600 kg ha^{-1}, aproximadamente.

La experimentación nacional en cereales es muy reducida. González *et al.* (2001) probaron el agregado de 100 kg ha^{-1} de un granulado calcáreo dolomítico con 22% de Ca y 13% de Mg, y 50 kg ha^{-1} un granulado de yeso con 22% de Ca y 18% de S, sobre un cultivo de trigo en San Nicolás, Pcia. Buenos Aires. Los productos fueron aplicados a la siembra y en línea, simultáneamente una fertilización fosfórica (100 kg ha^{-1} de fosfato diamónico) y 50 kg ha^{-1} de urea. Las enmiendas produjeron ligeros incrementos del rendimiento.

6. Acidez del suelo y necesidad de encalado

6.1. Principales fuentes de acidez

La acidez edáfica puede afectar el crecimiento de las plantas en forma directa, pero también indirecta, incidiendo negativamente en la disponibilidad de nutrientes, los niveles de elementos fitotóxicos, la actividad microbiana y hasta en las condiciones físicas de los suelos. Este problema es considerado como uno de las principales limitantes para la producción agropecuaria a nivel mundial. Aproximadamente 25-30% de los suelos del mundo están de alguna manera afectados por problemas de acidez y muchos de ellos se encuentran en las regiones más productivas (Havlin *et al.*, 2005a).

En regiones tropicales y subtropicales la problemática se origina en procesos genéticos naturales que provocan la pérdida de los elementos básicos en su conjunto, contenidos en los materiales originales. Esto se debió, en la mayor parte de los casos, a materiales originales alterables de carácter ígneo básico, como por ejemplo el basalto en el NO argentino, y un clima agresivo de alta temperatura y pluviosidad. En esas condiciones, dichos materiales se meteorizaron intensamente y las bases, además de gran parte del Si, fueron lixiviados. En estos ambientes sólo pueden desarrollarse especies vegetales adaptadas por su bajo requerimiento en estos elementos y tolerancia a efectos de toxicidad causados por el Al, Fe, Mn e H, que insaturan el complejo de cambio.

En regiones templadas el proceso de acidificación se genera fundamentalmente por razones antrópicas. Una de las causas de este proceso es la exportación de bases a través de la producción agropecuaria durante largos periodos de tiempo en regiones donde no ha existido historia de reposición de las mismas, mediante fertilización o aplicación de enmiendas básicas. A título de ejemplo se ilustra en la Figura 3 la exportación de Ca, Mg y K causada por la producción extensiva en la provincia de Santa Fe, durante 40 años comprendidos entre 1970 y 2010 (García y Vazquez, 2011).

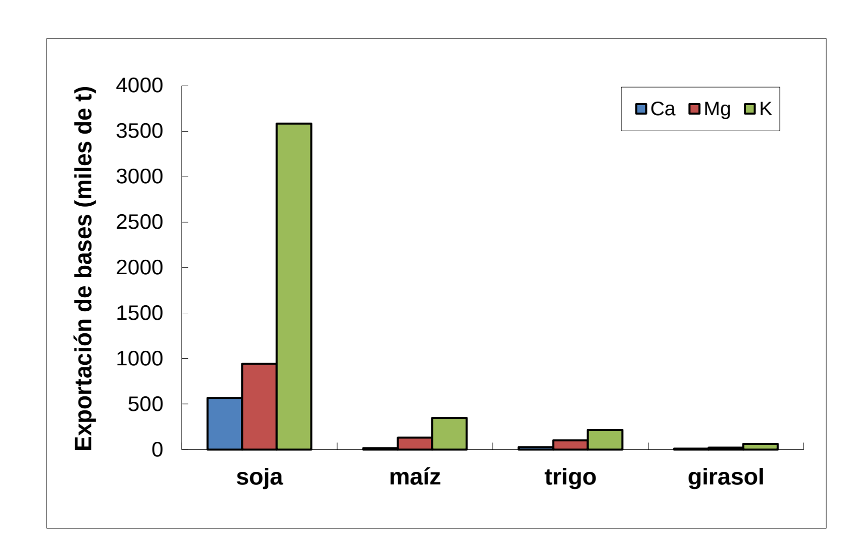


Figura 3. Exportación de bases de los suelos de la provincia de Santa Fe según cultivo para el período 1970-2010 (García y Vázquez, 2011).

Como puede observarse, el cultivo de soja es el responsable de la mayor exportación de bases debido a su gran expansión en Argentina en las últimas décadas sumado a los altos requerimientos de bases por parte de esta leguminosa.

Otra de las causas de la acidificación es el aumento de la aplicación de fertilizantes de alto índice de acidez, fundamentalmente los nitrogenados amoniacales o con grupo amino, como la urea, que producen una reacción general como la que se ilustra a continuación para el sulfato de amonio (1), la urea (2) y el nitrato de amonio (3):

1) $(NH_4)_2SO_4 + 4\,O_2 \rightarrow SO_4^{2-} + 2\,NO_3^{-} + \mathbf{4\,H^{+}} + 2\,H_2O$
Sulfato de amonio   Oxígeno   Sulfato   Nitrato   Protones   Agua

$$\text{Coloide} - 2\text{Ca ó } 2\text{Mg} + \mathbf{4\,H^{+}} \rightarrow \text{Coloide} - 4H^{+} + 2\,Ca^{2+} \text{ o } 2\,Mg^{+2}$$

2) $CO(NH_2)_2 + 4\,O_2 \rightarrow 2\,NO_3^{-} + \mathbf{2\,H^{+}} + CO_2 + H_2O$
Urea   Oxígeno   Nitrato   Protones   Dióxido de carbono   Agua

$$\text{Coloide} - \text{Ca ó Mg} + \mathbf{2\,H^{+}} \rightarrow \text{Coloide} - 2H^{+} + Ca^{2+} \text{ ó } Mg^{+2}$$

3) $NH_4NO_3 + 2\,O_2 \rightarrow 2\,NO_3^{-} + \mathbf{2\,H^{+}} + H_2O$
Nitrato de amonio   Oxígeno   Nitrato   Protones   Agua

$$\text{Coloide} - \text{Ca ó Mg} + \mathbf{2\,H^{+}} \rightarrow \text{Coloide} - 2H^{+} + Ca^{2+} \text{ ó } Mg^{+2}$$

Por cada mol de sulfato de amonio se producen 4 moles de H^{+} y en el caso de la urea o del nitrato de amonio se generan 2 moles de protones. Estos son cálculos teóricos, ya que se demostró que en determinadas situaciones experimentales, la acidez generada por el sulfato de amonio era del 75% del valor teórico, mientras que la de urea o nitrato de amonio del 50%. Este

aspecto magnifica la acidificación y posterior posibilidad de lixiviación de las bases causada por el sulfato de amonio.

Otros procesos que pueden derivar en la acidificación y lixiviación de bases en el suelo, son la hidrólisis de hierro y aluminio, la oxidación de compuestos de S y N nativos, la secreción de protones por las raíces, así como la respiración de microrganismos y raíces. Estos procesos naturales de acidificación son de importancia secundaria en la región Pampeana Argentina en comparación con la magnitud de la remoción de bases y el uso de fertilizantes nitrogenados originados por la agricultura, particularmente de las últimas décadas.

La aplicación de enmiendas básicas al suelo y particularmente, el encalado, han sido las prácticas más comúnmente utilizadas para neutralizar la acidez edáfica. Debido a la importancia del proceso de acidificación edáfica sobre la capacidad productiva de los suelos, se ha destinado mucho esfuerzo en investigación tendiente a determinar el pH óptimo para el crecimiento de cada cultivo y desarrollar métodos para establecer requerimientos de encalado.

6.2. Diagnóstico de necesidades de encalado

La literatura científica ha citado en muchas oportunidades rangos de pH del suelo óptimos para el crecimiento de cada cultivo. Este rango varía en valores y amplitud con las diferentes especies. En general es ampliamente aceptado que condiciones de neutralidad o ligera acidez son apropiadas para el crecimiento de la mayoría de las plantas. En la Tabla 10 se señalan pH óptimos y algunos rangos de tolerancia para especies vegetales de importancia económica.

Tabla 10. pH óptimo y de tolerancia para especies vegetales cultivadas (Porta *et al.*, 1999).

Especie	Óptimo	Rangos de tolerancia para rendimiento satisfactorio
Alfalfa (*Medicago sativa*)	6,5-7,5	6,0-8,0
Algodón (*Gossypium hirsutum*)	5,2-6,0	4,8-7,5
Arroz (*Oryza sativa*)	5,0-7,0	4,0-8,0
Avena (*Avena sativa*)	5,5-7,0	4,0-7,5
Caña de azúcar (*Saccarum officinarum*)	6,0-7,5	4,5-8,5
Cebada (*Hordeum vulgare*)	5,5-7,0	5,5-8,8
Centeno (*Secale cereale*)	5,5-6,5	4,0-7,7
Girasol (*Helianthus annus*)		6,0-7,5
Maiz (*Zea mays*)	5,5-7,0	5,0-8,0
Soja (*Glycine max*)	6,0-7,0	4,5-7,5
Sorgo (*Soghum bicolor*)	5,5-7,0	6,0-7,0
Trébol blanco (*Trifolium repens*)	6,0-7,0	-
Trébol rojo (*Trifolium pratense*)	6,0-7,0	-
Trigo (*Triticum sp.*)	6,0-7,0	5,8-8,5

Cabe aclarar, que los valores de pH como los citados en la Tabla 10, son sólo orientativos, ya que el nivel crítico informado por diferentes autores es variable y posiblemente esté relacionado con otras propiedades edáficas como los niveles de Al y Mn, el contenido de materia orgánica y particularmente, el material genético utilizado. A título de ejemplo para el caso de la soja, Weisz *et al*. (2003) verificaron incrementos de rendimiento hasta valores de pH 6,0 en suelos de Carolina del Norte en EEUU. Pierce y Warncke (2000) informaron un valor crítico de 5,9 en suelos de Michigan por debajo del cual habría respuesta al encalado. Bell (1996) sugirió que dicho valor es 5,1 en suelos de Lousiana de alta meteorización, mientras que Caires *et al*. (1998) no obtuvieron respuesta al encalado aún con niveles de pH de 4,5 y 32% de saturación de bases en Brasil. Pagani *et al.* (2009) determinaron pH críticos para maíz y soja de aproximadamente 6.5 en Molisoles del estado de Iowa, EEUU. Estos antecedentes sugieren que el pH puede tener connotaciones distintas en diferentes tipos de suelos y sistemas productivos, mostrando lo inconveniente de la extrapolación de niveles críticos para cualquier especie. A pesar de las posibles limitaciones de este indicador, el pH del suelo es la principal herramienta utilizada mundialmente para diagnosticar problemas de acidez.

Existen diversos protocolos para la determinación del pH. Cuando se determina en suspensión suelo:agua (ó suelo $CaCl_2$ 0,01-0,02 M) de 1:1 a 1:2,5, es llamado “pH actual” en Argentina y en muchos otros países. Si bien el método más difundido es la determinación del pH del suelo en suspensiones suelo:agua, el uso de suspensiones suelo:$CaCl_2$ ha sido recomendado como más estable y menos variable sobre todo en suelos con alto contenido de sales (Miller y Kissel, 2010), aunque no se han encontrado ventajas importantes de su utilización en suelos con bajos contenidos de sales (Pagani y Mallarino, 2011).

Esta determinación de pH actual, tanto en agua como en $CaCl_2$, se realiza rutinariamente en los laboratorios. Dicho índice revela información acerca de la llamada “acidez activa” y cuantifica la actividad de H^+ en la solución externa del suelo (no afectada por la carga de los coloides), pero no informa sobre la acidez de reserva o la capacidad reguladora (buffer) de un suelo. La determinación del pH en suspensiones suelo:KCl 1N, denominada pH potencial, permite cuantificar la concentración de H^+ de la solución externa, y adicionalmente los H^+ que se encuentran adsorbidos en el complejo de intercambio. Esta medida da idea de la reserva de H^+. A título de ejemplo, dos suelos pueden tener igual pH actual, por ejemplo 6, y pH potencial 5,8 y 4,5, respectivamente. El segundo suelo tendrá una evolución más desfavorable a futuro y requerirá mayor cantidad de corrector para elevar el pH.

El pH actual es generalmente utilizado para decir si un suelo necesita o no corrección mediante la aplicación de enmiendas básicas, pero no para determinar los requerimientos de encalado, es decir la dosis de enmienda necesaria para elevar el pH del suelo a un valor dado. Por esta razón, se han desarrollado numerosos métodos analíticos tendientes a determinar la cantidad de enmienda necesaria para neutralizar la acidez edáfica. Estos incluyen incubaciones de suelo, titulaciones directas y soluciones buffers, entre otros.

Las incubaciones de suelo consisten en la adición de diferentes dosis de $CaCO_3$ u otra base en forma pura y finamente molida a un suelo. Luego el mismo se humedece y es incubado en cámara o invernáculo hasta alcanzar el equilibrio durante un periodo de semanas a meses, dependiendo de varios factores. Una vez que la base reacciona completamente, es decir se estabiliza el pH, se determina dicho valor de pH y el requerimiento de encalado puede ser determinado como se muestra en la Figura 4. El requerimiento de encalado determinado con esta metodología en laboratorio muchas veces no refleja (generalmente subestima) las necesidades de corrector a campo, por lo que se han propuesto factores de corrección con el fin de adaptar la

información generada en condiciones controladas a condiciones de producción. Si bien este método se sugiere como ideal, es impráctico como análisis de rutina por laboratorios comerciales. Por lo tanto solo se lo utiliza como patrón para calibrar otros métodos más rápidos y convenientes (Hoskins y Erich, 2008).

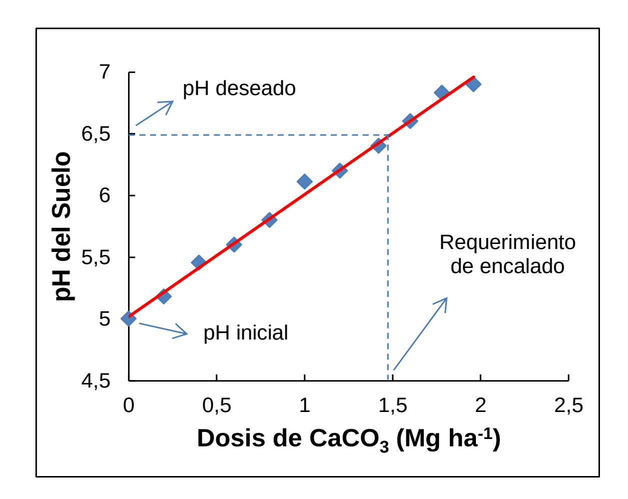


Figura 4. Determinación de requerimientos de encalado mediante incubación de suelo. El ejemplo utiliza un pH deseado de 6.5, que es el pH óptimo para el crecimiento de muchos cultivos.

Otra metodología utilizada para determinar acidez intercambiable y necesidades de encalado es la titulación simple (por única vez) con $BaCl_2$-Trietanolamina a pH 8.2 (Bhumbla and McLean, 1965; Dietzel *et al.*, 2009). Si bien este método es muy efectivo para cuantificar la acidez de reserva de un suelo, no es comúnmente empleado por laboratorios comerciales debido a su laboriosidad. Además, algunos resultados han sido desalentadores acerca de su utilidad para determinar requerimientos de encalado a campo (Pagani y Mallarino, 2012a).

Debido a las dificultades prácticas y complejidad de los métodos descriptos, se han desarrollado métodos más sencillos y rápidos para determinar requerimientos de encalado en forma indirecta. Entre estos métodos se encuentran las soluciones reguladoras o buffers (mezcla de un acido débil con una base conjugada) que resisten cambios de pH pero que resultan en una disminución lineal del pH a medida que la acidez potencial del suelo reacciona con el buffer (Sims, 1996). En la Figura 5 se muestra un esquema conceptual del funcionamiento de una solución buffer. Cuando el buffer se adiciona a una suspensión de suelo ácido y agua, se produce una disminución en el pH del sistema que es proporcional a la acidez de reserva de ese suelo, la cual está relacionada a la cantidad de cal necesaria para neutralizar dicha acidez. Se requiere un estudio de calibración regional para determinar la relación entre los requerimientos de encalado (cantidad de material básico necesario para elevar el pH del suelo a un valor dado) y los valores de cierto buffer (Sims, 1996).

Los buffers originalmente propuestos para el medio-oeste americano y otras regiones de Norte America fueron el SMP (Shoemaker *et al.*, 1961), buffer doble (Woodruff, 1948; Yuan, 1974); Adams-Evans (Adams y Evans, 1962) y Mehlich (Mehlich, 1976), entre otros. Sin embargo, estos métodos contienen reactivos tóxicos y peligrosos para el medioambiente como el p-paranitrofenol, K_2CrO_4 y $BaCl_2 \cdot 2H_2O$. Por lo tanto, recientemente se han propuesto métodos que no contienen componentes peligrosos pero que brindan resultados similares o

correlacionados a los buffers originalmente desarrollados (Pagani y Mallarino, 2012a). Ejemplos de estos nuevos buffers son el Sikora (Sikora, 2006) y Mehlich modificado (Hoskins y Erich, 2008).

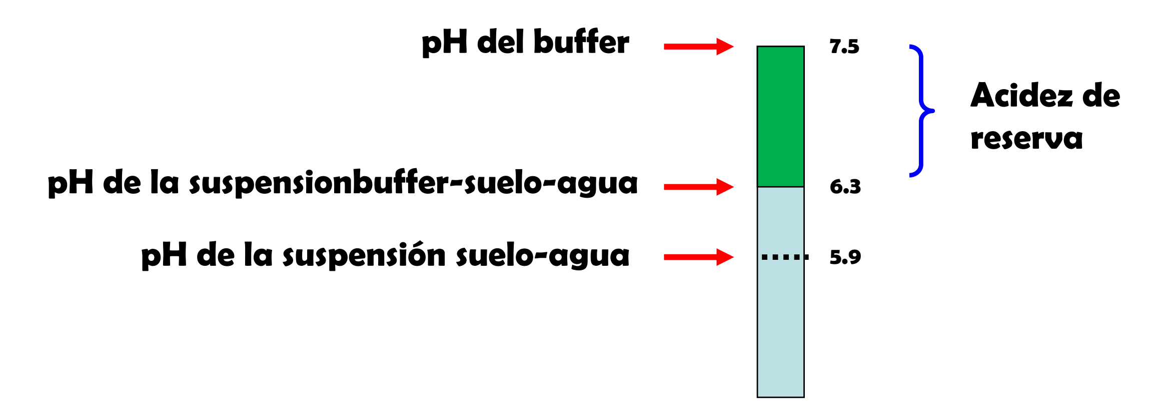


Figura 5. Esquema conceptual de la reacción de una solución buffer con el suelo.

Otro tipo de métodos de requerimientos de encalado que no requieren reactivos que comprometan el ambiente, son las titulaciones directas empleando adiciones simples de $Ca(OH)_2$. Algunos estudios recientes en este sentido son los de Liu *et al.* (2005) y Kissel *et al.* (2007). Estos métodos se basan en el supuesto de que el incremento de pH de un suelo es lineal con la adición de una base en el rango entre 5 y 6.5 (Liu *et al.*, 2005; Hoskins y Erich, 2008). Considerando esta asunción, un solo punto es suficiente para calcular los requerimientos de encalado de manera análoga a la presentada en la Figura 4.

Existen algunas experiencias nacionales referidas a la evaluación de métodos de requerimientos de encalado recomendados en distintas publicaciones, cuando se utilizan cálculos teóricos no calibrados para el sistema específico de producción (suelo-clima-material genético), utilizados en algunos laboratorios comerciales en el país. Vázquez *et al.* (2002) demostraron la variabilidad de resultados obtenidos por la aplicación de algunas de estas metodologías de diagnóstico (Tabla 11) y la ausencia de correlación entre los resultados de los diferentes métodos, así como entre el diagnóstico efectuado por ellos y la respuesta de la alfalfa al agregado de caliza o dolomita en ambientes templados.

Tabla 11. Necesidad de encalado ($CaCO_3$) según diferentes técnicas diagnóstico (Vázquez *et al.*, 2002).

Localidad	**CT**	**BD**	**SMP**	**H^+ 1 vez**	**H^+ 2 veces**	**H^+ 3 veces**
	----------------------- kg ha^{-1} $CaCO_3$ -----------------------					
Tres Arroyos	1500	2730	1214	1340	2680	4020
Lincoln	1000	3569	1055	1560	3120	4680
Bavio	3720	5977	1684	910	1820	2730
Pergamino	1928	6067	1388	0	0	0
Lujan	2370	5140	1915	0	0	0
Baradero	2400	3782	1275	470	940	1410

Azul	6600	6077	1332	1120	2240	3360
Carlos Casares	750	2540	912	0	0	0
Etcheverry	3600	7337	1376	1780	3560	5340

CT: curva de titulación (Abruña y Vicente, 1955)
BD: buffer doble (Yuan, 1974)
SMP: buffer simple (Mc Lean *et al.*, 1978)
H^+: H de cambio (Richter *et al.*, 1982)(Múltiplo 1, 2 y 3, de acuerdo a sugerencia de los autores)

Cabe aclarar que la utilización del valor de pH del suelo, la capacidad buffer o su reacción ante el agregado de un buffer como herramientas de diagnóstico y recomendación de encalado, tiene particular importancia en suelos cuyo pH esta por debajo de 5,3-5,5, situación de solubilización del Al y por lo tanto, posibilidades de toxicidad de este elemento. Esto generalmente ocurre en suelos de áreas subtropicales-tropicales.

Cuando la situación de acidez es extrema, por ejemplo en Oxisoles y Ultisoles, y el porcentaje de saturación básica es muy bajo, problemática asociada a suelos de regiones tropicales y subtropicales, el objetivo puede ser reducir la acidez y elevar la saturación básica en su conjunto. En tales casos, puede emplearse un cálculo simple para estimar la cantidad de corrector ($CaCO_3$) a utilizar:

$$NC = CIC\ (V2 – V1) / EQ$$

NC: Necesidad de corrector ($CaCO_3$ (t ha^{-1}))
CIC: Capacidad de intercambio catiónica ($cmol_c$ kg^{-1})
V2: Saturación básica deseada (%)
V1: Saturación básica real (%)
EQ: Eficiencia química del corrector (%) (concepto que se abordará más adelante)

Por ejemplo, en un suelo con 20 $cmol_c$ kg^{-1} de CIC, 50 % de saturación básica real, 60% de saturación deseada y un corrector con 80% de eficiencia química, se tiene:

$$NC = 20\ (60 – 50)/80 = 2,5\ t\ ha^{-1}$$

En caso de utilizar otro producto deberá corregirse el resultado según la Tabla 12. Algunos autores modifican el resultado obtenido por esta ecuación, a través de un factor del orden de 1,5, con la finalidad de considerar reacciones paralelas de los correctores en la neutralización del Al no intercambiable relacionado con la materia orgánica (Cochrane *et al.*, 1980). En este tipo de suelos ácidos otro elemento de juicio es el porcentaje de Al intercambiable. Las diferentes especies toleran cantidades variables de insaturación con Al intercambiable. Por ejemplo, trigo y soja no toleran porcentajes de Al intercambiable > 10%, sorgo > al 20% y maíz al > 25% (Carver y Ownby, 1995; Kollmeier *et al.*, 2000; Villagarcía *et al.*, 2001).

Numerosos estudios han demostrado extensa variabilidad espacial del pH del suelo y necesidades de encalado dentro de los lotes de producción. Pierce y Warncke (2000) sugieren la conveniencia de la aplicación de los productos encalantes mediante técnicas de agricultura de

precisión (manejo de sitio específico a través del empleo de dosis variable) a los fines de evitar sub o sobreaplicaciones. En este sentido, Pagani y Mallarino (2012a) determinaron lotes contrastantes en cuanto a variabilidad espacial de pH del suelo, buffers y requerimientos de encalado en el estado de Iowa, EEUU. En la misma región, Bianchini y Mallarino (2002) señalaron que la aplicación de cal en forma variable dentro del lote ayudaba a disminuir la variabilidad espacial del pH edáfico.

Al igual que para otros nutrientes, la tecnología de aplicación variable de cal, requiere de un muestreo de suelos intensivo, el cual puede ser en grillas regulares, en zonas o mediante el uso de instrumentos que colectan muestras de suelo y analizan su pH en tiempo real. Además, se requiere de aplicadores que, guiados por sistemas de geoposicionamiento global (GPS) y mapas de prescripción, puedan realizar aplicaciones efectuando cambios de dosis en tiempo real. Si este sistema se utiliza correctamente, puede derivar en ahorros en la cantidad de material calcáreo, mayores eficiencias de uso de la enmienda y, eventualmente, en aumentos en la producción de los cultivos.

7. Tipos de enmiendas calcáreas y tecnología del encalado

Tradicionalmente para la corrección de acidez se han usado productos correctores o enmiendas, tales como calcita, dolomita y cal viva o apagada, entre otros. Estos productos que contienen Ca y/o Mg en diferentes proporciones, han dado origen a la práctica denominada encalado. La aplicación de materiales básicos como $CaCO_3$, CaO o $Ca(OH)_2$, produce 2 efectos en el suelo, uno meramente nutricional, que es el suministro de Ca y/o Mg, y por otro, produce un incremento en el pH del suelo, neutralizando los H^+ y disminuyendo la solubilidad del Al^{+3}. Los productos utilizados con mayor frecuencia como encalantes, así como su valor de neutralización se indican el la Tabla 12. Si bien el pH del suelo podría elevarse a través del agregado de otros compuestos, generalmente se emplean los cálcico/magnésicos con el objetivo de reponer estos elementos con funciones nutricionales para los cultivos, así como de estructurantes edáficos en suelos de regiones templadas, ya que mejoran la dinámica del aire y el agua del suelo.

Tabla 12. Equivalentes en carbonato de calcio de los materiales calcáreos más utilizados para uso agropecuario (Norma IRAM 22451).

Tipo	**Designación IRAM**	**Composición química**	**Equivalente en $CaCO_3$**
			--------- % ---------
I	Caliza	$CaCO_3$	100
II	dolomita	$CaCO_3.MgCO_3$	100x + 119y †
III	conchilla	$CaCO_3$	100
IV	cal viva calcítica	CaO	178
V	cal viva dolomítica	CaO.MgO	178x + 250y
VI	cal hidratada cálcica (apagada)	$Ca(OH)_2$	135
VII	cal hidratada dolomítica	$Ca(OH)_2.Mg(OH)_2$	135x + 172y

† x e y representan la composición porcentual de cada componente.

Los valores de equivalentes de $CaCO_3$ presentados son considerados teóricos ya que algunos estudio como el de Alcarde y Rodella (1996) demostraron que la presencia de fosfatos, sulfatos o de cristales de Si en los productos correctores, podrían modificar esta equivalencia teórica.

Para agregar $CaCO_3$ puede utilizarse caliza, la cual contiene alrededor de 40% de $CaCO_3$, o dolomita, que posee alrededor de 21% de $CaCO_3$ y 13% de $MgCO_3$. Estos valores son variables por tratarse de productos de minería. De la misma manera puede utilizarse conchilla molida, que cuenta con un porcentaje de $CaCO_3$ mayor al 90%. La cal viva (CaO) se obtiene por calcinación del $CaCO_3$, es un producto cáustico y de alta higroscopicidad, aunque de gran velocidad de reacción y poder de neutralización. La cal apagada ($Ca(OH)_2$) se obtiene hidratando la cal viva. Existen otros productos utilizados con este fin, tales como espumas azucareras, residuos calcáreos de la fabricación del papel, la cola de cal, un subproducto de la fabricación del cemento y residuos de la industria del acero, que contienen elevados porcentajes de silicatos de Ca y Mg, conocidos como Escorias Thomas, las que además se caracterizan por un cierto contenido de P, por lo que son usados como fertilizantes fosforados.

7.1. Reacción de los correctores

Las reacciones de neutralización para el CaO se presentan a continuación:

$$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2$$
$$Ca(OH)_2 + 2H^+ \longrightarrow Ca^{2+} + 2\,H_2O$$
$$CaO + 2H^+ \longrightarrow Ca^{2+} + H_2O$$

Debido a la alta solubilidad del CaO y del $Ca(OH)_2$, estos productos son de reacción rápida comparativamente con el $CaCO_3$, especialmente en condiciones de moderada acidez o climas fríos.

La reacción del $CaCO_3$ es la siguiente:

$$CaCO_3 + 2H^+ \longrightarrow Ca^{2+} + H_2O + CO_2$$
$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \longrightarrow Ca(HCO_3)_2$$
$$Ca(HCO_3)_2 + 2H^+ \longrightarrow Ca^{2+} + CO_2 + H_2O$$
$$CaCO_3 + 2H^+ \longrightarrow Ca^{2+} + CO_2 + H_2O$$

Los silicatos de las escorias básicas, subproducto de la industria del acero, reaccionan en el suelo de forma aun más lenta que los $CaCO_3$ y reaccionan en el suelo de la siguiente manera:

$$CaSiO_3 + 2H^+ \longrightarrow Ca^{2+} + SiO_2 + H_2O$$

La disolución de los materiales de encalado también depende del tamaño de partícula. Es así que la eficiencia química (EQ) se define como el porcentaje del producto corrector que reacciona en forma inmediata. Dicha eficiencia depende de la pureza del producto y el tamaño de partícula. De acuerdo a la Norma IRAM 22451 (Tabla 13) la eficiencia será inferior al 5% para

productos con tamaños de partícula mayores a 2,36 mm y del 100% para partículas de 75 μm o menores. La eficiencia química puede calcularse de la siguiente manera:

EQ (%) = P x Sumatoria (% de c/tamaño x eficiencia relativa)

EQ: eficiencia química
P: pureza del material (tanto por uno)

A título de ejemplo si un material fuera 90% puro y tuviera 50% de partículas de 850 μm y otro 50% de 425 μm, el cálculo sería:

EQ (%) = 0,90 x [(50 x 0,17) + (50 x 0,30)]
EQ = 21,2%

Tabla 13. Granulometría y eficiencia relativa de los materiales calcáreos para uso agropecuario (Norma IRAM 22451).

Tamiz IRAM	**Eficiencia relativa**
μm	
850	0,17
425	0,30
250	0,55
150	0,80
75	1,00
<75	1,25

Las tasas de aplicación de los materiales para encalar van desde unos cientos de kg ha^{-1}, hasta cifras del orden de las 4-6 t de producto ha^{-1} o superiores. Las cantidades requeridas varían de acuerdo al criterio del empleo de estos productos. En caso de suelos de pH realmente bajo, donde el objetivo es reducir la acidez, la cantidad a aplicar depende justamente de la acidez actual y potencial del suelo, su poder buffer, así como del pH o porcentaje de saturación básica que se desean alcanzar. Mientras que en situaciones donde la acidez no es pronunciada, la cantidad y tipo de corrector a elegir, dependerán de la necesidad de Ca y/o Mg, analizados desde el punto de vista de la nutrición vegetal. En general las cantidades a que se arriba en este segundo caso son significativamente menores. Pagani y Mallarino (2012b) no encontraron diferencias en la respuesta de maíz y soja a la aplicación de caliza y dolomítica en suelos ácidos del estado de Iowa, EEUU. Vázquez *et al.* (2002) demostraron que en suelos de la provincia de Buenos Aires, la alfalfa respondió en forma diferencial en algunos casos, al agregado de caliza y dolomita (Figura 6) demostrando la necesidad específica de alguna de las bases, mientras que en otros casos la respuesta a estos productos fue equivalente.

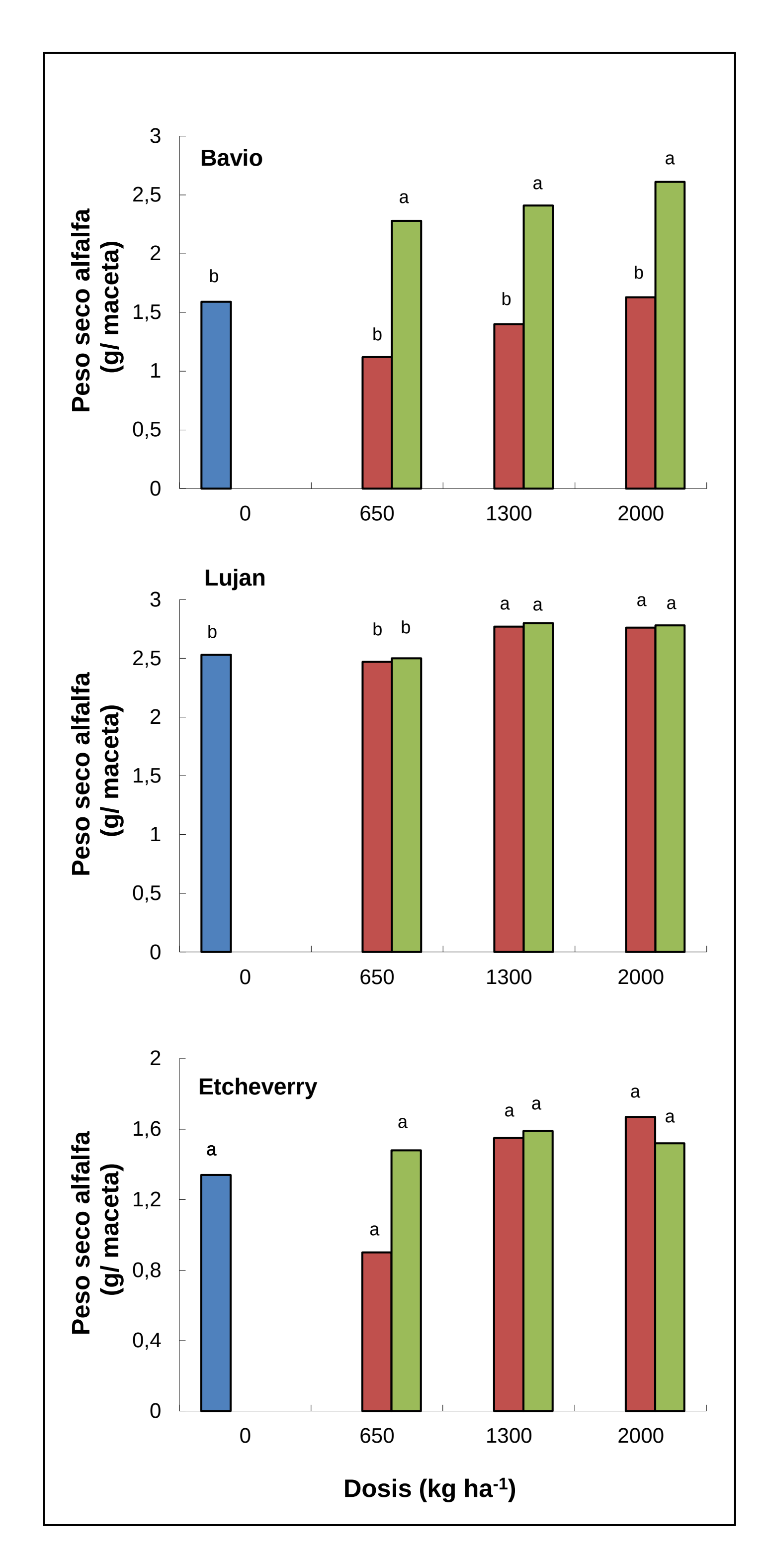


Figura 6. Respuesta de la alfalfa al agregado de caliza ($CaCO_3$) y dolomita ($CaCO_3.MgCO_3$) en 3 suelos de la Pcia. de Buenos Aires (Vázquez *et al.*, 2002).

Loide (2004), Järvan (2004) y Järvan y Põldma (2004) demostraron la incidencia del tipo de corrector sobre el rendimiento de diversas especies, a igualdad de dosis, explicando el

fenómeno a través del pH alcanzado en cada caso y el balance catiónico de los mismos. Pagani y Mallarino (2012b) observaron menores incrementos de pH del suelo con dolomita que con calcita (con similares valores de equivalentes de $CaCO_3$) y explicaron parcialmente este efecto a través de la menor solubilidad del $MgCO_3$ presente en la dolomita con respecto al $CaCO_3$ de la calcita. En la Figura 7 puede apreciarse la modificación del pH producido en tres suelos de la Pcia. de Buenos Aires por el agregado de caliza y dolomita en diferentes dosis (Vázquez *et al.*, 2002).

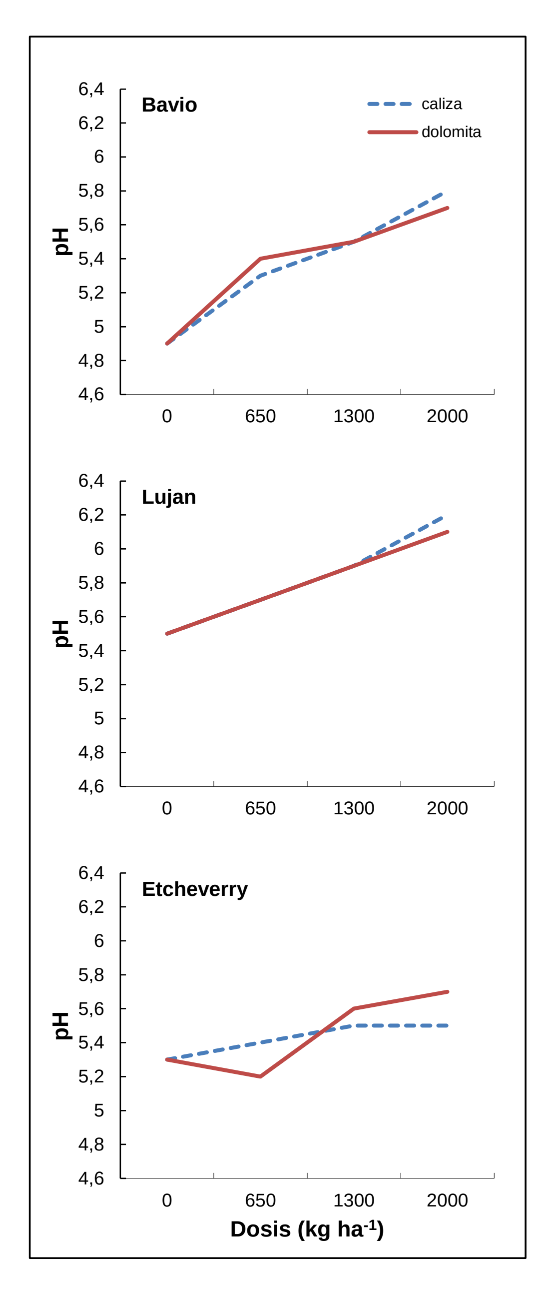


Figura 7. Evolución del pH ante el agregado de 3 dosis de caliza ($CaCO_3$) y dolomita ($CaCO_3$.Mg CO_3) en 3 suelos de la Pcia. de Buenos Aires (Vázquez *et al.*, 2002).

Estos productos pueden aplicarse en cualquier época del año. En general se anticipan algunos meses a los cultivos de mayor sensibilidad, incorporándolos al suelo, para permitir su solubilización. Sin embargo, en planteos de siembra directa Ciotta *et al.* (2004) y Amaral *et al.* (2004) demostraron que la aplicación en superficie de caliza puede tener efecto hasta los 20 cm de profundidad. Farina *et al.* (2000), Caires *et al.* (2003) y Vázquez *et al.* (2008) comprobaron que la aplicación conjunta de caliza y yeso mejora la movilización profunda del Ca, en aplicaciones superficiales de los productos. Vázquez *et al.* (2010, 2012) comprobaron respuesta a campo de la práctica para los cultivos de alfalfa (Figura 8) y soja (Figura 9) en suelos de la Región Pampeana. . En ambos casos resultaron más eficientes las dosis menores de encalado. En el apartado siguiente se expondrán algunas posibles razones.

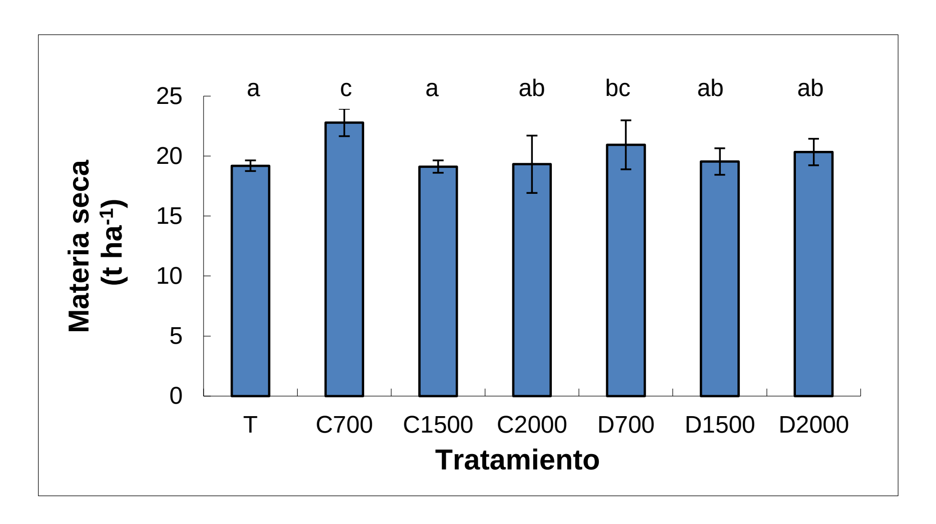


Figura 8. Efecto del tratamiento de encalado sobre la producción de materia seca de alfalfa en 10 cortes en un suelo Hapludol entico con pH 5,1 de la localidad de Laboulaye, Prov. de Córdoba. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (p<0,05) entre tratamientos. Referencia: T: testigo; C: caliza; D: dolomita. Dosis: 700, 1500 y 2000 kg ha^{-1}.

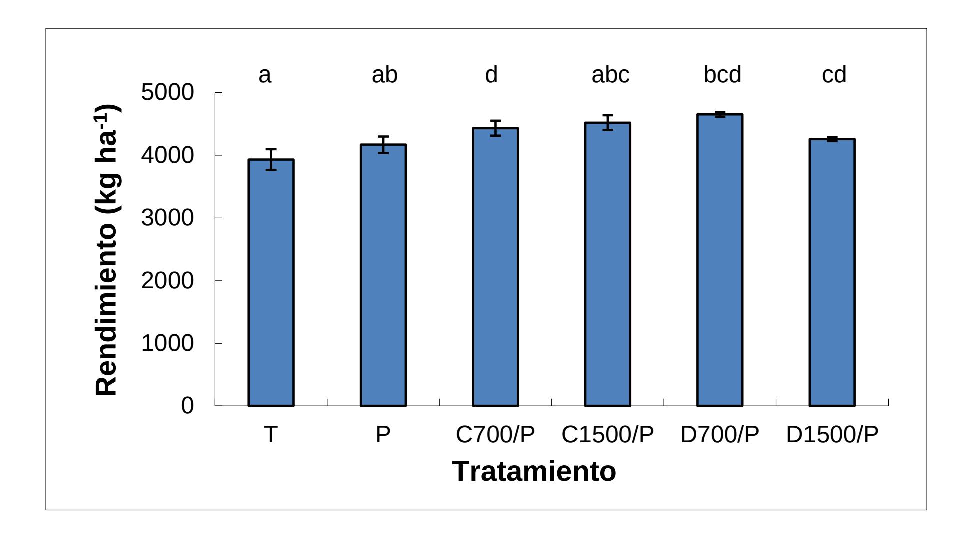


Figura 9. Efecto de los tratamientos de encalado sobre el rendimiento de soja en un suelo Argiudol thaptoárgico con pH 5,7 de Lincoln, Prov. de Buenos Aires. Letras distintas

indican diferencias estadísticas significativas ($p<0,05$) entre tratamientos. Referencia: T: testigo; P: 100 kg ha^{-1} de superfosfato triple; C: caliza; D: dolomita. Dosis de corrector: 700 y 1500 kg ha^{-1}.

Cabe destacar que en algunos casos de suelos encalados se ha demostrado respuesta a la aplicación de fertilizantes fosforados, aun a valores de P extractable no señalados como limitantes para los cultivos. Este hecho deriva de la inmovilización temporaria de P provocada por la precipitación con Ca/Mg contenidos en los correctores. La Figura 9 ilustra una situación de esta naturaleza en un suelo con 24 mg kg^{-1} de P extractable por método Bray-1.

La periodicidad de la aplicación de los correctores va desde frecuencias anuales, en situaciones de elevada acidez y cultivos sensibles, a encalados cada 2-4 años, en situaciones menos limitantes. La periodicidad depende de su residualidad en cada sistema suelo-planta. Los factores que modifican dicha residualidad pueden verse en la Caja 2.

7.2. Algunos efectos secundarios del encalado

El aumento del pH del suelo puede acarrear algunos efectos secundarios, entre ellos la modificación de la estabilidad de los agregados del suelo. En suelos ácidos el incremento de pH disminuye las cargas variables positivas y con ellas podría disminuir la estabilidad estructural (Roth y Pavan, 1991). Albuquerque *et al.* (2003) demostraron que si bien ocurre un aumento de la dispersión de arcilla con la dosis de calcáreo en el caso de un suelo del planalto brasilero, el mayor aporte orgánico originado por el beneficio del encalado, compensa el proceso dispersivo, no alterándose en consecuencia la estabilidad estructural. Como puede verse, el fenómeno es multivariable y es necesario profundizar en estos procesos para diferentes ambientes edafo-climáticos. Otros autores, por el contrario, han puesto en evidencia una mejora en dicha propiedad, haciendo referencia a la formación de puentes cálcicos que favorecen la floculación de los coloides del suelo (Chan y Heenan, 1999).

Relacionado con la modificación de las propiedades físicas, Vázquez *et al.* (2009) encontraron que el agregado de caliza y dolomita modificó la resistencia a la penetración en forma variable según dosis/profundidad de evaluación en suelos del Pdo. de La Plata (Buenos Aires). Los autores destacaron que dosis bajas del orden de 1.000 kg ha^{-1} redujeron la resistencia respecto del testigo, afirmando su acción sobre la estructuración del suelo. Sin embargo, se advirtió que dosis más elevadas, 1.500 y 2.000 kg ha^{-1}, por el contrario, aumentaban la resistencia respecto del testigo, argumentando que podría tratarse de recristalización de los carbonatos. Esta recristalización obturaría el espacio poroso en los suelos de textura fina y por ende con predominio de poros de tamaño pequeño. Estos resultados se asociaron con medidas biológicas (desarrollo de hongos y rendimiento de alfalfa), por lo que en suelos de texturas finas podrían ser desaconsejadas dosis elevadas de los productos. Más recientemente Nicora *et al.* (2012) comprobó efectos comparables en suelos de textura franco-arenosa del centro E de la provincia de Buenos Aires. Otros autores, sin embargo, encontraron respuesta favorable del cultivo de soja a dosis superiores a 4.600 kg ha^{-1} en Molisoles del SE bonaerense (Barbieri *et al.*, 2010). Es por esta razón que este efecto secundario desfavorable no podría generalizarse y se señala la necesidad de mayor experimentación a nivel local.

Otro efecto secundario de esta práctica es la variación en la disponibilidad de nutrientes, al margen de los aportados por el encalado. Es ampliamente conocida la modificación de la

solubilidad de los fosfatos con el incremento del pH. De la misma manera se comprobaron cambios en la disponibilidad de micronutrientes. Fernades Boaro *et al.* (1999) comprobaron menor disponibilidad de Cu, Zn y Mn en plantas de poroto sobre suelos encalados. Andreotti *et al.* (2001) afirmaron poder superar la deficiencia de Zn causada por el encalado de maíz, mediante fertilización con este elemento.

Uno de los efectos secundarios de mayor importancia es la reducción del Al soluble. A valores de pH 5,3-5,5 el Al forma $Al(OH)_3$ precipitado y por debajo de dicho rango se forman especies solubles, capaces de ser intercambiadas (Al^{3+}, $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH_2)^{+}$). Cuando el encalado permite superar aquel valor de pH, la toxicidad del elemento se reduce considerablemente. Esto es principalmente relevante en el noreste de nuestro país que posee suelos con mayor grado de desarrollo debido al clima subtropical y por ende, mayor acidez y factibilidad de toxicidad de Al. Si bien en el ámbito templado la concentración de Al soluble potencial es relativamente reducida, Millán *et al*. (2010) encontraron que el encalado disminuyó también la concentración de este elemento en el ámbito templado Argentino.

Caja 2: Efecto residual del encalado

El efecto residual de los productos correctores depende de la velocidad de su reacción. Entre los factores que intervienen en este proceso pueden mencionarse:

- Condición de clima y suelo: alta temperatura y humedad, así como acidez del suelo, favorecen la solubilidad de los correctores, por lo tanto la residualidad de las enmiendas básicas se ve reducida en ambientes tropicales. En este tipo de suelos y en situaciones de texturas gruesas, el movimiento profundo de las bases es mayor y por lo tanto se reduce la residualidad.
- Naturaleza química del corrector: los óxidos e hidróxidos de bases fuertes reaccionan más rápido que las sales de bases débiles, tales como los carbonatos, incidiendo de esa manera en la residualidad de la práctica.
- Tamaño de partícula: cuanto mayor es el tamaño de partícula, menor la reacción inmediata y mayor el efecto a más largo plazo.
- Dosis del corrector: a menor dosis, menor residualidad
- Fuentes de acidificación: a mayor exportación de bases por la producción y mayores dosis de fertilizantes de carácter ácido, a posteriori de la práctica, menor la residualidad del producto.

8. Suelos afectados por sodio y ventajas del enyesado

8.1. Origen del sodio y consecuencias sobre el crecimiento vegetal

Aproximadamente 20% la superficie mundial cultivable se encuentra afectada por sales y 35% de la misma se ve limitada por exceso de Na (Havlin *et al.*, 2005b). La sodificación de los suelos puede tener orígenes naturales u antrópicos y ocurrir tanto en regiones áridas como húmedas. En regiones áridas y semiáridas donde la evapotranspiración supera a la precipitación, gran parte del agua del suelo junto con la que escurre superficialmente, se acumula en las áreas más bajas del relieve. La evaporación del agua provoca una acumulación de sales en dichas áreas deprimidas. Sin embargo, en regiones húmedas, el movimiento lateral de sales de Na a través del escurrimiento subsuperficial hacia las zonas más bajas del relieve y el ascenso de las napas

sódicas, pueden generar áreas con concentraciones excesivas de este elemento. Algunas actividades del hombre, fundamentalmente el riego con aguas de naturaleza sódica, especialmente las bicarbonatadas y carbonatadas, puede también producir la sodificación de los suelos.

El Na es particularmente detrimental para la producción agropecuaria debido a sus implicancias negativas sobre la estructura del suelo y a su efecto tóxico sobre el crecimiento de las plantas y microrganismos en condiciones de extrema sodicidad. Cuando un alto porcentaje de la CIC del suelo se encuentra ocupado por Na^{+}, los agregados se dispersan, reduciendo la estructura. Estos suelos se tornan impermeables al agua y se reduce la circulación de aire, desarrollan fuertes costras superficiales y pueden anegarse fácilmente debido a la reducida infiltración. En general, a medida que el porcentaje de Na intercambiable de un suelo aumenta, se incrementa el porcentaje de coloides dispersos y se reduce la conductividad hidráulica de un suelo (Summer, 1993).

Las propiedades del Na como dispersante de las partículas coloidales del suelo están relacionadas a la estructura electroquímica de este elemento. A diferencia del Ca y el Mg que tienen propiedades floculantes, el gran radio hidratado debido a las moléculas de agua asociadas con este catión y su monovalencia, le confieren al Na propiedades altamente dispersantes.

La identificación de este tipo de suelos puede realizarse fácilmente a campo, observando el tipo de vegetación característica (Tabla 14) o la morfología del perfil. En estos suelos es común encontrar “chorreaduras” oscuras de materia orgánica entre los agregados, tapizando las superficies verticales de los agregados. En ambientes de alta evapotranspiración, se forman sobre la superficie eflorescencias oscuras de humatos de Na, denominadas álcali negro. Si el suelo posee horizonte de acumulación de arcilla, puede llegar a la expresión máxima de la sodicidad, que son agregados en forma de columnas en dichos horizontes, es decir prismas con las cabezas redondeadas, fenómeno provocado por la dispersión de la parte superior del prisma.

Tabla 14. Plantas indicadoras de suelos salinos y salino-sódicos

Especie indicadora	**Condición de adaptación**
Atriplex confertifolia (cachiyuyo)	salinidad y sodicidad
Kochia scoparia (morenita)	salinidad
Frankenia grandifolia (varetilla)	salinidad
Distichlis spicata (pelo de chancho, pasto salado)	salinidad y sodicidad
Distichlis scoparia (pasto salado)	salinidad y sodicidad
Sporobolus indicus (pasto alambre)	salinidad y sodicidad
Salicornia sp. (jume)	salinidad
Diplachne uninervia	salinidad y sodicidad
Chloris berroi	salinidad y sodicidad
Eryngium echinatum Urban (cardo Mon)	salinidad y sodicidad
Spilanthes stolonifera	salinidad y sodicidad
Stenotaphrum secundatum (gramilla)	salinidad y sodicidad
Ambrosia tenuifolia Sprengel (altamisa)	salinidad y sodicidad
Vulpia dertonensis Gola	salinidad y sodicidad
Dichondra repens Ferts	salinidad y sodicidad

Adesmia bicolor (alverjilla babosita)	salinidad y sodicidad
Tessaria absinthioides (brea, suncho negro)	salinidad y sodicidad
Muhlenbergia asperifolia	salinidad y sodicidad
Heliotropium curassavicum (cola de gama, cola de zorro)	salinidad y sodicidad

En laboratorio, la sodicidad puede identificarse a través de la evaluación del PSI (porcentaje de Na intercambiable) o de la RAS (relación de adsorción de Na en el extracto de saturación):

$$PSI\ (\%) = Na\ intercambiable \times 100/CIC$$

$$RAS\ (s/unidad) = Na\ /[(Ca + Mg)/2]^{1/2}$$

Los umbrales de calificación de la sodicidad establecidos para el PSI son variables de acuerdo a la textura de los suelos. Tradicionalmente, el Laboratorio de Salinidad de los EEUU (Richards, 1980) estableció el valor de 15% de PSI y de 13 de RAS para diferenciar suelos sódicos de no sódicos. Sin embargo se ha visto que esa diferenciación puede ser mucho más compleja en ecosistemas diversos. Vázquez (2003) evaluando suelos irrigados, demostró que con valores de PSI cercanos a 5% en suelos franco-arenosos a arenosos del Centro y NO de la provincia de Buenos Aires, las propiedades hidráulicas se ven severamente afectadas. Los valores de RAS guardan equilibrio con los PSI, aunque la relación estricta entre ambas variables es particular para cada sistema suelo de acuerdo a sus soluciones internas y externas.

Si bien el pH de los suelos sódicos es generalmente superior a 8,3 – 8,5, no necesariamente es alcalino en todos los casos. Suelos sódicos con abundancia de SO_4^{2-} o Cl^-, pueden tener pH cercano a la neutralidad y hasta ácido, debido a que se trata de aniones de ácidos fuertes. En la Tabla 15 se muestra la sensibilidad de diferentes especies a la sodicidad.

Tabla15. Tolerancia de algunos cultivos a la sodicidad (Ayers y Wescot, 1987).

Sensibles	**Semitolerantes**	**Tolerantes**
Persea americana (aguacate)	Penisetum typhoides (mijo perla)	Medicago sativa (alfalfa)
Phaseolus vulgaris (poroto)	Daucus carota (zanahoria)	Hordeum vulgare (cebada)
Gossypium hirsutum germinación (algodón)	Trifolium repens (trébol blanco)	Oryza sativa (arroz, con transplante)
Zea mays (maíz)	Paspalum dilatatum (pasto miel)	Beta vulgaris (remolacha azucarera)
Vigna unguiculata	Festuca arundinacea (Festuca alta)	Cynodon dactylon (pasto Bermuda)
Pisum sativa (arveja)	Lactuca sativa (lechuga)	Gossypium hirsutum (algodón)
Pissum saccharatum	Saccharum officinarum (caña azúcar)	Agropyrum cristatum
Citrus paradisi (pomelo)	Trifolium alexandrinum (Trébol alejandrino)	Agropyrum elongatum
Phaseolus aureus	Melilotus parviflorus (Trébol de	Diplachna fusca

	olor)	
Lens culinaris (lenteja)	Avena sativa (avena)	Chloris gayana (grama Rodees)
Glysine max (soja)	Allium sativum (ajo)	
Cicer arietinum (garbanzo)	Allium cepa (cebolla)	
	Linum usitatissimum (lino)	
	Helianthus annus (girasol)	
	Medicago sativa (alfalfa)	
	Oryza sativa (arroz, con siembra directa)	
	Secale cereale (centeno)	
	Hordeum vulgare (cebada)	
	Sorghum vulgare (sorgo)	
	Lycopersicon esculentum (tomate)	
	Triticum vulgare (trigo)	

8.2. Tecnología de enyesado

Como se ha visto, los suelos afectados por Na^+ presentan un deterioro en sus propiedades físicas y dicha afectación es una función de su concentración, en relación a otras bases del suelo. Mientras que el Na^+ ejerce efectos dispersantes, el Ca^{2+} y en menor medida el Mg^{2+}, cumplen roles estructurantes, al funcionar como puentes catiónicos entre los coloides del suelo. Esta propiedad del Ca^{2+} es la que se persigue cuando se agrega yeso ($CaSO_4.2H_2O$) al suelo, produciéndo el reemplazo que se ilustra a continuación:

$$\text{Coloide} - 2Na + CaSO_4 \rightleftharpoons \text{Coloide} - Ca + Na_2SO_4$$

El yeso es un producto natural y en algunos casos industrial, soluble y en general de bajo costo. El reemplazo del Na^+ por el Ca^{+2} debe ser acompañado de la percolación profunda del Na^+, por lo que las condiciones de drenaje deben ser tales que esto sea posible. Ante condiciones de grave deterioro de la estructura del suelo, la eficiencia del enyesado se reduce drásticamente a consecuencia de la imposibilidad de eliminar el Na^+ intercambiado. Para cultivos intensivos es común acompañar la práctica con drenes artificiales para favorecer este proceso con riegos de lavado.

Generalmente, las dosis de yeso que se utilizan para remplazar el exceso de Na^+ adsorbido al complejo de intercambio del suelo varía con el PSI (Caja 3), las condiciones texturales y el régimen pluviométrico, entre otros factores. Keren *et al.* (1983) y Agassi *et al.* (1985) lograron mantener alta tasa de infiltración en suelos israelíes de 400 mm año^{-1} de precipitación, con 5 t ha^{-1}. Lacerda *et al.* (2004) demostraron el efecto benéfico de la aplicación de Ca sobre la resistencia a la toxicidad de Na^+ y Cl^- en plantas de sorgo, reduciendo su concentración en las hojas y aumentando el nivel de K^+.

Caja 3: Cálculo de la dosis de yeso

El cálculo se basa en el PSI original y el deseado, expresando, a partir de esas cifras, la cantidad de Na^+ a ser reemplazado. A modo de ejemplo se presentan los cálculos para un suelo sódico con las características que se mencionan en la Tabla 16:

Se plantea la situación de pretender reducir el PSI de 6% a 3% en el horizonte superficial (HA) y de 22% a 10% en el horizonte E (HE).

Horizonte A (HA):

PSI = 6 % = 1,3 * 100/ 20,9
PSI = 3% = X * 100/20,9, por lo tanto X = 3 * 20,9 /100 = 0,63 $cmol_c\ kg^{-1}$

Es decir, de un valor de 1,3 $cmol_c\ kg^{-1}$ de Na^+ se pretende llegar a 0,63 $cmol_c\ kg^{-1}$, o sea, reemplazar 0,67 $cmol_c\ kg^{-1}$, lo que equivale a 0,154 g kg^{-1} de Na^+ (Peq Na = 23 gr). Efectuando los cálculos a nivel de ha, asumiendo una densidad de 1,2 t $(m^3)^{-1}$, se tiene:

Peso HA = 10.000 m^2 * 0,23 m * 1,2 t $(m^3)^{-1}$ = 2.760 t ha^{-1}
Na int. a reemplazar = 0,154 * 2.760 = 425 kg ha^{-1}

Horizonte E (HE):

PSI = 22 % = 3 * 100/ 13,6
PSI = 10% = X * 100/13,6 por lo tanto X = 10 * 13,6 /100 = 1,36 $cmol_c\ kg^{-1}$

Es decir de un valor de 3 $cmol_c\ kg^{-1}$ de Na^+ se pretende llegar a 1,36 $cmol_c\ kg^{-1}$, es decir reemplazar 1,64 $cmol_c\ kg^{-1}$, lo que equivale a 0,377 g kg^{-1} de Na^+. Efectuando los cálculos a nivel de ha asumiendo densidad 1,3 t $(m^3)^{-1}$ se tiene:

Peso HE = 10.000 m^2 * 0,12 m * 1,3 t $(m^3)^{-1}$ = 1.560 t ha^{-1}
Na int. a reemplazar = 0,377 * 1.560 = 588 kg ha^{-1}

Sumando las necesidades de enyesado de los horizontes A (425 kg ha^{-1}) y E (588 kg ha^{-1}), se tiene un total de 1.013 kg ha^{-1}.

Tabla 16. Composición del complejo intercambiable de un suelo sódico.

Horizonte	**A**	**E**	**Bt**
Profundidad (cm)	0-23	23-35	35-80
CIC ($cmol_c\ kg^{-1}$)	20,9	13,6	29,0
Cationes de intercambio ($cmol_c\ kg^{-1}$)			
Ca^{2+}	11,1	7,2	9,2
Mg^{2+}	2,4	2,2	4,5
Na^+	1,3	3,0	12,3
K^+	1,3	0,9	3,0

PSI (%)	6	22	42

El valor obtenido a través del cálculo presentado en la Caja 3 debe afectarse por la eficiencia del producto, dada por su pureza y el tamaño de partícula, y por la tasa de intercambio, es decir el porcentaje de Ca^{2+} que es capaz de reemplazar al Na^{+} adsorbido. Esta capacidad de intercambio depende de la concentración total de sales y del PSI, siendo mucho mayor ante elevados valores de PSI (Rhoades, 1982). La remoción del Na^{+} a PSI < 10% puede ser reducida, pues parte del Ca^{2+} reemplaza al Mg^{2+} intercambiable, pudiendo en estos casos la eficiencia ser menor al 30%. La eficiencia también puede ser reducida en texturas finas debido al lento intercambio ocurrido dentro de las unidades estructurales de la microporosidad (Manin *et al.*, 1982).

La práctica del enyesado es utilizada con mayor frecuencia en producciones intensivas, donde frecuentemente la sodicidad es causada por el agua de riego. En estas situaciones las condiciones de drenaje necesarias para la eliminación del Na suelen ser más favorables que en las condiciones naturales donde se encuentran estos suelos en regiones húmedas, generalmente áreas deprimidas con problemas de drenaje. Adicionalmente, en producciones intensivas se pueden construir sistemas de drenaje artificiales para hacer más eficiente la práctica.

Simunek y Suarez (1997) han propuesto un modelo de transporte unidimensional multicomponente (UNSTACHEM) que entre otros factores considera la conductividad hidráulica y la velocidad del flujo del agua, para predecir la cantidad necesaria de yeso a agregar en diferentes situaciones. Además, existe un método para evaluar la necesidad de enyesado, el cual consiste en agitar 5 g de suelo con 100 ml de una solución conteniendo al menos de 28 meq l^{-1} de Ca en forma de yeso, filtrado y evaluación de Ca y Mg en el líquido resultante. El Ca retenido por el suelo permite calcular la necesidad de yeso, sabiendo que 40 g de Ca estan contenidos en 175 g de yeso.

Existen en el mercado otros productos correctores de suelos sódicos, los que reaccionan de manera diferente, de acuerdo a la presencia o ausencia de carbonatos alcalino-térreos:

- S elemental: necesita ser oxidado por acción microbiana hasta llegar a H_2SO_4, por lo que se lo considera de reacción lenta.
- Polisulfuro de Ca: es un líquido alcalino de color oscuro, debe ser oxidado para actuar por lo que es de reacción lenta.
- H_2SO_4: es de reacción rápida, pero tiene dificultades de manipuleo y es cáustico.
- $CaCl_2$: es de reacción rápida pero su costo suele ser elevado.

La equivalencia entre los mejoradores puede consultarse en la Tabla 17.

Tabla 17. Equivalencia entre los mejoradores de suelos sódicos

Producto	**t equivalente a 1 t de S**
S	1
Polisulfuro de Ca	4,17
H_2SO_4	3,06
$FeSO_4$	8,69
Yeso	5,38
$Al_2(SO_4)_3$	6,94

Existe además, una práctica de manejo de suelos sódicos que consiste en la arada profunda (hasta 1 m) con el objetivo de incorporar el Ca acumulado a mayores profundidades, ejerciendo un efecto comparable al del agregado de yeso (Costa y Godz, 1994). En el área de la Pampa Deprimida el subsuelo en general es rico en $CaCO_3$. Este procedimiento fue usado con éxito en el pasado en suelos rusos con abundancia de yeso en el subsuelo.

9. Conclusión

El Ca y el Mg son macronutrientes secundarios de carácter básico, requeridos para el crecimiento vegetal en cantidades relativamente grandes. Estos elementos se encuentran en el suelo en forma catiónica, pueden formar parte de minerales primarios, secundarios o materia orgánica, estar adsorbidos al complejo de intercambio o en la solución del suelo. Ambos han sido mayoritariamente utilizados en fertilizaciones y correcciones de suelos naturalmente ácidos de regiones tropicales y subtropicales. No obstante, en algunas regiones templadas el proceso de acidificación o disminución del contenido de estos nutrientes en el suelo, se ha producido fundamentalmente por la exportación de bases a través de la producción y por el uso de fertilizantes nitrogenados amoniacales. En estas situaciones se han informado respuestas por parte de numerosos cultivos a la aplicación de fertilizantes cálcicos y magnésicos, así como también a la aplicación de enmiendas básicas tendientes a neutralizar la acidez del suelo. En producciones intensivas, aun existiendo cantidades adecuadas de Ca y Mg en el suelo, puede ocurrir que la elevada demanda por parte de este tipo de cultivos provoque que no se logren reponer estos nutrientes a la solución de suelo a la velocidad con que son absorbidos, por lo que en muchas situaciones es necesaria su aplicación. Por estas razones, se han generado numerosos métodos para determinar necesidades de Ca y Mg y encalado. Dichos métodos se han basado en medidas absolutas (concentración en sitios de intercambio) y relativas (porcentaje de la saturación de cada base, relaciones entre las distintas bases intercambiables).

El uso de enmiendas básicas es la práctica más común para neutralizar suelos ácidos. A lo largo de la historia, se han propuesto numerosos métodos para determinar requerimientos de encalado. En todos los casos es necesario realizar calibraciones regionales de las metodologías de diagnóstico, debido a las interacciones suelo-clima-practicas de manejo. Algunos de estos métodos se han evaluado en la Argentina con resultados variables.

Por otro lado, también se ha señalado la utilidad del uso de enmiendas cálcicas (específicamente yeso o sulfato de calcio) para intentar recuperar suelos afectados por Na. Los suelos sódicos presentan severas limitantes para el crecimiento vegetal debido a su pobre estructuración y toxicidad directa en casos de severa sodicidad. En áreas reducidas o producciones intensivas, esta práctica ha demostrado ser muy efectiva para disminuir la toxicidad del Na y mejorar las condiciones físicas. El cálculo de la necesidad de yeso puede realizarse en base al porcentaje de sodio intercambiable a corregir. Tanto en el caso del encalado como del enyesado es necesario calcular la eficiencia química del producto, en base a su pureza y al tamaño de partícula.

10. Bibliografía

Abruña, F. y J. Vicente. 1955. Requirement of a cuantitative method for determining the lime

requirement of soil. Journal of Agric. of the University of Puerto Rico 39: 41 - 45.

Adams, F., y C.E. Evans. 1962. A rapid method for measuring lime requirement of red-yellow podzolic soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 26:355-357.

Agassi, M., J. Morin, y I. Shainberg. 1985. Effect of draindrop impact energy and water salinity on infiltration rates of sodic soils. Geoderma 36: 263 – 276.

Alburquerque, J.A., C. Bayer, P.R. Ernani, A.L. Mafra, y E.C. Fontana. 2003. Aplicação de calcário e fósforo e e estabilidade da estrutura de um solo ácido. Rev. Bras. Ciênc. Solo 27 (5): 799-806.

Alcarde, J.C., y A.A. Rodella. 1996. O Equivalente em carbonato de cálcio dos corretivos da acidez dos solos. Sci. Agric. 53(2-3): 204 – 210.

Amaral, A.S., I. Anghinoni, R. Hinrichs, y I. Bertol. 2004. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um Cambissolo em plantio direto. Rev. Bras. Ciênc. Solo 28(2): 359 – 367.

Anjos Reis, R., P.C. Rezende Fontes, J.C. Lima Neves, y N. Terra Santos. 1999. Total soil electrical conductivity and critical soil K^+ to Ca^{2+} and Mg^{2+} ratio for potato crops. Soil Agric. 56(4): 993 – 997.

Andrade, F., H. Echeverría, N. González, S. Uhart, y N. Darwich. 1996. Requerimientos de nitrógeno y fósforo de los cultivos de maíz, girasol y soja. Boletín Técnico *134*. EEA INTA, Balcarce, Argentina.

Andrade, S.A.L., C.A. Abreu, y M.F. Abreu. 2003. Interação do chumbo, da saturação por bases do solo e de micorriza arbuscular no crescimento e nutrição mineral da soja. Rev. Bras. Ciênc. Solo 27(5): 945 – 954.

Andreotti M., E. C. A. De Souza, y C.A. Costa Cruscio. 2001. Componentes morfológicos e produção de materia seca de milho em função da aplicação de calcário e zinco. Sci. Agric. 58(2): 321 – 327.

Ayers, R.S., y D. Wescot. 1987. La Calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje. 29 (1), Roma, 174 p.

Azcon Bieto, J., y M. Talon. 2008. Fundamentos de Fisiología Vegetal. Mc Graw Hill Ed. Madrid, España. ISBN 8448151682. 656 p.

Balcaza, L. 1996. Fertirrigación en cultivos hortícolas. Boletín Hortícola *FCAyF/UNLP*, octubre, 7-9.

Balcaza, L. 2003. Deterioro de los suelos cultivados bajo invernáculo. *IDIA* XXI, 4: 196-200.

Barbieri, P. A., H.E. Echeverría, y H.R. Saínz Rozas. 2010. Soybean response to lime and micronutrients application in argentinean molisols. 102 American Society of Agronomy (ASA) annual meeting. 31 Octubre-3 Noviembre. Long Beach CA-USA. Actas CD 1 p.

Bear, F.E., y S.J. Toth. 1948. Influence of Ca on availability of other soil cations. Soil Sci. 65: 69-75.

Bell, P.F. 1996. Predicting liming needs of soybean using soil pH, aluminum and manganese soil test. Comm soil sci plant anal 27 (13-14): 2749-2764.

Bhumbla, D.K., y E.O. Mc Lean. 1965. Aluminum in soils: VI. Changes in pH-dependent acidity, cation-exchange capacity, and extractable aluminum with additions of lime to

acid surface soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 29: 370-374.
Bianchini, A.A., y A.P. Mallarino. 2002. Soil-sampling alternatives and variable-rate liming for a soybean-corn rotation. Agron. J. 94:1355-1366.
Borie, B.F., F.A. Gallardo, M.L.G. Mora, y J.C. García. 1999. Sensibilidad y tolerancia a la acidez de los cultivos en condiciones de campo. Frontera Agrícola 5 (1-2): 19 – 28.
Büll, L.T., R.L. Villas Bôas, y J. Nakagawa. 1998. Variações no balanço catiônico do solo inducidas pela adubação potássica e efeitos na cultura do alho vernalizado. Sci. Agric. 55(3): 456-464.
Bundy, L.G. 2004. Corn fertilization. University of Wisconsin-Madison and University of Wisconsin-Extension, Cooperative Extension. Cooperative Extension Publishing. 12 p.
Caires, E.F., W.A. Chueiri, E.F. Madruga, y A. Fuigueiredo. 1998. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. Rev Bras Ciênc Solo 22: 27.
Caires, E.F., J. Blum, G. Barth, F.J. Garbuio, y M.T. Kusman. 2003. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. Rev. Bras. Ciênc. Solo 27(2): 275.
Calderón Sáenz, F. 2008. Contribución al conocimiento de la nutrición mineral del clavel miniatura, estudio sobre 5 variedades para ajuste de niveles críticos. http://www.drcalderonlabs.com/Investigaciones/Perfil_Nutricional_Plantas_Clavel_Mini_4.htm. Consultado 4/6/08.
Camberato, J.J., y W.L. Pan. 2000. Bioavailability of calcium, magnesium and sulfur. En Handbook of Soil Science. Sección D: Soil Fertility and Plant Nutrition. Cap. 1: Bioavaibility of major essential nutrients: D3 – D69. Ed. Malcom Summer. ISBN 0-8493-3136-6. EEUU.
Carver, B., y Y J. Ownby. 1995. Acid soil tolerance in wheat. Adv Agron 54: 117-173.
Chan K.Y., y D.P. Heenan. 1999. Lime-induced loss of soil organic carbon and effect on agrégate satability. Soil Sci. Soc. Am. J. 63: 1841-1844.
Ciampitti, I., y F. García. 2008. Requerimientos nutricionales. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrients secundarios. II Hortalizas, Frutales y Forrajeras. Informaciones agronómicas 37. Buenos Aires. 22 p.
Ciotta, M.N., C. Bayer, P.R. Ernani, S.M.V. Fontoura, C. Wobeto, y J.A. Albuquerque. 2004. Manejo da calagem e os components da acidez de Latossolo Bruno em plantio direto. Rev. Brás. Ciênc. Solo 28(2): 317 – 326.
Cochrane, T., J. Salinas, y P. Sánchez. 1980. An equqtion for liming acid mineral soils to compesate crops aluminium tolerance. Trop. Agr. 57 (2): 133-140.
Costa, J.L., y P. Godz. 1994. Respuesta de Natracuoles a la mezcla de horizontes y al agregado de yeso. Boletín Técnico Nº 122. SAGyP, INTA Balcarce. 15 p.
Culot, J. 1967. Condiciones edáficas relacionadas con la hipomagnesemia del ganado en el SE bonaerense. INTA. Balcarce. Boletín Técnico Nº51.
Darwich, N. 2006. Los nutrientes secundarios: azufre, calcio y magnesio. En Manual de Fertilidad de Suelos y uso de Fertilizantes. Cap. VII, p. 131-150. 3º Edición. Fertilizar

Asoc. Civil, Mar del Plata. ISBN 987-43-9313-0. 289 p.
Demanet, R.F., B.M. Schnettler, y M.L.G. Mora. 1999. Efecto del encalado y su relación con los nutrientes sobre la producción de pasturas en suelos ácidos. Frontera Agrícola 5 (1-2): 95-110.
Dietzel, K.A., Q.M. Ketterings, y R. Rao. 2009. Predictions of lime needs for pH and aluminium management of New York agricultural soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 73:443-448.
Farina, M.P.W., P. Channon, y G.R. Thibaud. 2000. A comparation of strategies for ameliorating subsoil acidity: I. Long-term growth effects. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 646-651.
Fernández Boaro C.S., J.A. Proença Vieira De Moraes, J.D. Rodríguez, E.O. Onol, y P.R. Curi. 1999. Interações entre magnesio e micronutrientes metálicos durante o desenvolvimento de feijoeiro, en solução nutritiva. Sci. Agric. 56 (1): 125-134.
Figueroa, M., y M. Torres Duggan. 2002. Cebolla. Fertilizar, diciembre: 12-14. INTA. Argentina.
Gambaudo, S., L. Picco, P. Soldano, y A. Cervetti. 2007. Fertilización compuesta con calico, magnesio y azufre en soja. Resultados experiencias campaña 2006/07. INTA. EEA Rafaela. Información Técnica cultivos de verano. Publicación Miscelánea Nº108.
García, M., y M. Vázquez. 2011. Impacto de la evolución de la agricultura santafesina en la pérdida de nutrientes básicos de los suelos. Valoración económico-ecológica. V Congreso Iberoamericano sobre Desarrollo y Ambiente/V Jornada de la Asociación Argentino Uruguaya de Economía Ecológica. Universidad Nacional del Litoral de Sta Fe, 9/2011.
González, B., S. Gambaudo, D. Bersano, D. Tenorio, J. Neifert, y D. Osenda. 2001. Enmiendas en trigo. Fertilizar 6(23): 18-19.
Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, y W.L. Nelson. 2005a. Soil acidity and alkalinity. En J.L. Havlin, J.D. Beaton, S.L. Tisdale, W.L. Nelson (ed.) Soil fertility and fertilizers. Pearson Prentice Hall. New Jersey. 7th ed, p. 45-96.
Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, y W.L. Nelson. 2005b. Sulfur, calcium, and magnesium. En J.L. Havlin, J.D. Beaton, S.L. Tisdale, W.L. Nelson (ed.) Soil fertility and fertilizers. Pearson Prentice Hall. New Jersey. 7th ed, pp. 219-243.
Hedin, L.O., L. Granat, G.E. Liquens, T.A. Buishand, J.N. Galloway, T.J. Butler, y H. Rodhe. 1994. Sep declines in atmospheric base cationes in regions of Europe and North America. Nature 367: 351-354.
Hoskins, B.R., y M.S. Erich. 2008. Modification of the Mehlich lime buffer test. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 39:2270-2281.
INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria). 2006. Resultados experimentales en tomate de mesa. Reunión Técnica N1454, Las Brujas, Uruguay. 43 p.
Järvan, M. 2004. Available plant nutrients in growth substrate depending on various lime materials used for neutralizing bog peat. Agronomy Research 2(1): 29-37.
Järvan, M., y P. Põldma. 2004. Content of plant nutrients in vegetables depending on various lime materials used for neutralising bog peat. Agronomy Research 2(1): 39-48.

Kamprath, E.J. 1984. Crop response to lime on soils in the tropic. En Soil acidity and liming: 349-368. Ed. F. Adams. Am. Soc. Agronomy, Wisconsin, EEUU.

Keren, R., I. Shainberg, H. Fenkel, y Y. Kalo. 1983. The effect of exchangeable sodium and gypsum on surface runoff from loess soil. Soil Sci. Am. J. 47: 1001-1004.

Kissel, D.E., R.A. Isaac, R. Hitchcock, L.S. Sonon, y P.F. Vendrell. 2007. Implementation of soil lime requirement by a single-addition titration method. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 38:1341-1352.

Kollmeier, M., H.H. Felle, y W.J. HORST. 2000. Genotypical differences in aluminum resistance of maize are expressed in the distal part of the transition zone. Is reduce basi-petalauxin flow involved in inhibition of root elongation by aluminum? Plant Physiol. 122 (3) 945-956.

Lacerda, C.F., J. Cambraia, M.A. Oliva, y H.A. Ruiz. 2004. Influencia do calico sobre o crescimento e solutos em plántulas de sorgo estresadas com cloreto de sodio. Rev. Bras. Ciênc. Solo 28(2): 289 – 295.

Liu, M., D.E. Kissel, M.L. Cabrera, y P.F. Vendrell. 2005. Soil lime requirement by direct titration with a single addition of calcium hydroxide. Soil Sci. Soc. Am. J. 69: 522-530.

Loide, V. 2004. About the effect of the contents and ratios of soil's available calcium, potassium and magnesium in liming of acid soils. Agron. Res. 2(1): 71-82.

Malavolta, E., G. Vitti, y S. De Oliveira. 1989. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Ed. Asociação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Piracicaba, Brasil. 201 p.

Manin, M., A. Pizarra, y H.W. Van Hoorn. 1982. Drainage and desalinization of heavy clay soil in Portugal. Agric. Water Manag. 5: 227-240.

Maroto, J.V. 2002. Horticultura herbácea especial. Ed. Mundiprensa. 5ªEd. 702 p.

Martínez, F., y G. Cordone. 2008. Soja 2008. Para Mejorar la Producción/39 Estación Experimental Agropecuaria Oliveros Centro Regional Santa Fe" ISSN 1850-163X p. 78-80.

Mc Lean, E.O., D.J. Eckert, G.Y. Reddy, y F.J. Trierweiler. 1978. An improved SMP soil lime requirement method incorporating double-buffer and quick-test features. Soil Sci. Soc. Am. J. 42: 311-316.

Melgar, R., J. Lavandera, y M.E. Camozzi. 1999. Fertilización balanceada, clave para la alta productividad. Fertilizar 17: 24-25. INTA. Argentina.

Mehlich, A. 1976. New buffer pH method for rapid estimation of TA and lime requirement of soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 7: 637-652.

Mengel, K., y E.A. Kirkby. 2000. Principios de Nutrición Vegetal. Cap.11: 401 – 423, Cap 12: 425 – 434. Ed. Instituto Internacional de la Potasa, Basilea, Suiza. 607 p.

Millán, G., M. Vázquez, A. Terminiello, y D. Santos Sbuscio. 2010. Efecto de las enmiendas básicas sobre el complejo de cambio en algunos suelos ácidos de la región pampeana. Ciencia del Suelo 28(2): 131-140.

Miller, R.O., and D.E. Kissel. 2010. Comparisons of soil pH methods on soils of North America. Soil Sci. Soc. Am. J. 74: 310-316.

Moseley, G., y D.H. Baker.1991. The efficacy of a high magnesium grass cultivar in controlling hypomagnesaemia in grazing animals. Grass Forage Sci. 46: 375-380.

Muñoz Hernández, R.J., y R.I. Silveira. 1998. Efeitos da saturação por bases, relações Ca:Mg no solo e níveis de fósforo sobre a produção de material seco e nutrição mineral do milho (Zea mays L.). Sci. Agric. 55(1): 79-85.

Nicora, Z., F. Guilino, A. Terminiello, G. Millán, y M. Vázquez. 2012. Efecto del Encalado sobre la Resistencia Mecánica de un Hapludol Éntico Bonaerense. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 16-20/5/2012. Mar del Plata, Argentina.

Oliveira, E.L. 1993. Rendimento de matéria seca e absorção de cálcio e magnesio pelo milho em função da relação cálcio/magnesio no solo. Ver. Bras. Ciênc. Solo 17: 383-388.

Oliveira, E.L., y M.S. Parra. 2003. Resposta do feijoeiro a relações variáveis entre cálcio e magnesio na capacidade de troca de cátions de latossolos. Rev. Bras. Ciênc. Solo 27 (5): 859-866.

Pagani, A., A.P. Mallarino, y J.E. Sawyer. 2009. Soil pH and lime management for corn and soybean: an ongoing on-farm project. North Central Extension-Industry Soil Fertility Conference. November 18, 2009. Des Moines, IA. p. 106-112.

Pagani, A., and A.P. Mallarino. 2011. Comparison of soil pH measured in water and calcium chloride to predict crop response to lime in Iowa. Agronomy Abstracts. CD-ROM. ASA-CSSA-SSSA. Madison, WI.

Pagani, A., y A.P. Mallarino. 2012a. Comparison of methods to determine crop lime requirement under field conditions. Soil Sci. Soc. Am. J. In press.

Pagani, A., y A.P. Mallarino. 2012b. Soil pH and Crop Grain Yield as Affected by the Source and Rate of Lime. Soil Sci. Soc. Am. J. In press.

Piaggio, D., y W. Costa. 1996. Fertirriego en tomate y pimiento. Fertilizar 4: 16-17. INTA. Argentina.

Pierce, F.J., y D.D. WARNKE. 2000. Soil and crop response to variable-rate liming for two Michigan Fields. Soil Sci. Soc. Am. J. 64: 774-780.

Pooviah, B.W., y A.S.N. Reddy. 1996. Calcium and geotropism. En Y. Waisel *et al*. Ed. Plants rotos: The hidden half. Academis Press. New York. p. 307-321.

Porta, J., M. López Acevedo, y C. Roquero. 1999. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente Cap. 10: 217-236. 2º Ed. Ediciones Mundi Prensa, Madrid. 849 p.

Richter, M., M. Conti, y G. Maccarini. 1982. Mejoras en la determinación de cationes intercambiables, ácidos intercambiables y capacidad de intercambio catiónica en suelos. Rev. Fac. Agronomía 3 (2): 145-155.

Rhoades, J.D. 1982. Reclamation and management of salt affected soils after drainage. p. 123-197. En Proc. 1st Ann. Western Prov. Conf. Ration. Water Soil Res. Manag. Alberta, Canadá.

Richards, L.A. 1980. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América. Ed. Limusa, 6° Ed. México. 172 p.

Romheld, V., y M. El-Fouly. 2001. Fertilización foliar, una vía no tradicional. *Fertilizar* 24: 30-

34. INTA, Argentina.
Roth, C.H., y M.A. Pavan. 1991. Effects of lime and gypsum on clay dispertion and infiltration in samples of Brazilian Oxisol. Geoderma 48: 351-361.
Sanchez, E. 1996. Manejo nutricional de frutos de pepita y carozo. Fertilizar 4: 12-13. INTA. Argentina.
Sanchez, E. 2007. Utilidad de los análisis foliares en frutales de hoja caduca. http://www.fertilizando.com/artículos. Consultado 2/9/07.
Sikora, F.J. 2006. A buffer that mimics the SMP buffer for determining lime requirement of soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 70: 474-486.
Silva, H., y P. Larraín. 1997. Manzanos: fertilizantes foliares cálcicos en desórdenes fisiológicos. Fertilizar 9: 16-19. INTA. Argentina.
Simunek, J., y D.L. Suarez. 1997. Sodic soil reclamation using multicomponent transport modeling. J. Irrig. Drainage Engin. 123: 367-375.
Sims, J. T. 1996. Lime requirement. In: D.L. Sparks, editor, Methods of soil analysis. Part 3. Soil Science Society of America Book Series No. 5. SSSA. Madison, WI. p. 491-515.
Summer, M.E. 1993. Sodic soils: New perspectives. Austr. J. Soil Res. 31: 683-750.
Vázquez, M., A. Piro, G. Millán, y J. Lanfranco. 2002. Pautas para erl diagnóstico de la problemática asociada a suelos ácidos de zonas templadas subhúmedas. Revista de la Asociación Argentina de la Producción Animal 23(2): 69-80.
Vázquez, M. 2003. Evaluación de la afectación de algunas propiedades edáficas bajo riego complementario en la provincia de Buenos Aires. Tesis Doctoral. FCNyM. UNLP, Argentina. Inédito. 216 p.
Vázquez, M., A. Terminiello, y G. Millán. 2008. Lixiviación de iones en un suelo tratado con enmiendas carbonáticas y yeso. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 16/5/08, Potrero de Funes, San Luis. ACTAS: 342. Trabajo completo versión electrónica.
Vázquez, M., A. Terminiello, A. Duhour, M. García, y F. Guilino. 2009. Efecto de correctores de acidez sobre las propiedades físicas de un Argiudol típico de la pradera pampeana. Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo 27 (1):67-76.
Vázquez, M., A. Terminiello, A. Casciani, G. Millán, P. Gelati, F. Guilino, J. García Díaz, J. Kostiria, y M. García. 2010. Influencia del agregado de enmiendas básicas sobre la producción de alfalfa (Medicago sativa l.) en ámbitos templados argentinos. Ciencia del Suelo 28 (2): 141-154.
Vázquez, M., A. Terminiello, A. Casciani, G. Millán, D. Cánova, P. Gelati, F. Guilino, A. Dorronzoro, Z. Nicora, L. Lamarche, y M. García. 2012.Respuesta de la soja (glicine max l.merr) a enmiendas básicas en algunos suelos de las provincias de Buenos Aires y Santa Fe. Ciencia del Suelo 30(1): 43-55.
Vigil, A. 2002. Viñedos. Fertilizar, diciembre: 18-22. INTA, Argentina.
Villagarcia, MR., T.E. Carter, JR., T.W. Ruffy, A.S. Niewoehner, M.W. Jennnette, y C. Arellano. 2001. Genotipyc ranking for aluminium tolerance of soybean root grown I hidroponics and sand cultura. Crops Sci; 412: 1499-1507.
Vivas, H. S., H. Fontanetto, y R. Albrecht. 2001. Fertilizacion con calcio, magnesio y azufre sobre la produccion de maiz en dos sitios del centro de Santa Fe. Información Técnica de Cultivos de Verano. Estación Experimental Agropecuaria Rafaela, INTA. Publicación

Miscelánea Nº 95, Nº 4: 1-5.
Vivas, H., y H. Fontanetto. 2003. Fósforo, azufre y calcio en la producción de soja en el Departamento San Justo. 2002/2003. INTA, Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Información Técnica de cultivos de verano. Campaña 2003. Publicación Miscelánea Nº100, Nº15, 5 p.
Weisz, R., J. White, B. Knox, y L. Reed. 2003. Long-term variable rate lime and phosphorus application for Piedmont no-till field crops. Precision Agric 4(3): 311-330.
Widmann, G. 2002. Naranjos. Fertilizar, diciembre: 15-17. INTA. Argentina.
Woodruff, C.M. 1948. Testing soils for lime requirement by means of a buffered solution and the glass electrode. Soil Sci. 66: 53-63.
Yuan, T.L. 1974. A double buffer method for the determination of lime requirement of acid soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 38: 437-440.
Zalewska, M. 2003. The efect of varios calcium, magnesium, potasium and hidrogen saturation of CEC on the yield and mineral composition of yelow lupine. Pol. J. Natur. Sc. 15 (3): 321-334.
Zalewska, M. 2005. The efect of varios calcium, magnesium, potasium and hidrogen saturation of CEC on the yield and mineral composition of oat. J. Elementology 10 (4): 1137-1148.
Zalewska, M. 2008. The efect of varios calcium, magnesium, potasium and hidrogen saturation of CEC on the yield and mineral composition of sunflower. Pol. J. Natur. Sc. 23 (2): 347-365.
Zapata, R. 2006. Química de los procesos pedogenéticos. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 358 p.